

ИЗГОТОВЛЕНІЕ ОБЪЕКТИВОВЪ
ДЛЯ
ТЕЛЕСКОПОВЪ, МИКРОСКОПОВЪ И ФОТОГРАФІИ.

—*—
МИКРОСКОПЪ И ТЕЛЕСКОПЪ.
— — —

ОПТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА.
—*—

СОСТАВИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

С. Е. ТРОЦЕВИЧЪ,

ЗАСЛУЖЕННЫЙ ПРЕПОДАВАТЕЛЬ ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ
ВЪ ВАРШАВСКОЙ 4-ой МУЖСКОЙ ГИМНАЗИИ.

—*—
ВАРШАВА.

ТИПОГРАФИЯ АКЦ. ОБЩ. С. ОРГЕЛЬБРАНДА СЫНОВЕИ.

1903.

Дозволено Цензурою.
Варшава, 8 августа 1903 года.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

	<i>Стр.</i>
Предисловіе	VII—X
Глава I. Геометрическая оптика.	
Предварительныя замѣчанія	1
Ходъ луча при преломленіи его сферическими поверхностями. Переходъ луча черезъ одну преломляю- щую сферическую поверхность.	4
Изображеніе свѣтящагося предмета	7
Связь между поперечнымъ и угловымъ увеличеніями	10
Фокусы и фокусныя разстоянія	12
Упрощеніе уравненій для изображеній	14
Полученіе уравненія для отраженія изъ уравненія для преломленія.	17
Вычисленіе луча при прохожденіи его черезъ преломляющія по- верхности	18
Тригонометрическія формулы для вычисленія пути луча при про- хожденіи его черезъ преломляющія поверхности.	21
Оптическія центрированныя системы. Прохожденіе свѣта черезъ центрированную оптическую систему.	28
Свойства двухъ сопряженныхъ плоскостей оптической системы. Обобщеніе формулы Лягранжа, формула Гельгольца	31
Нахожденіе изображенія произвольной точки	32
Фокусы, фокусныя разстоянія и фокусныя плоскости; главныя точки и главныя плоскости	33
Значеніе фокусныхъ плоскостей	37
Гауссовское опредѣленіе фокусныхъ разстояній.	40
Значеніе главныхъ плоскостей.	41
Самая общая и простая форма уравненій для изображеній, полу- чаемыхъ посредствомъ системъ.	42
Угловое увеличеніе и отношеніе фокусныхъ разстояній	44
Продольное увеличеніе и связь между увеличеніями разнаго рода.	45
Кардинальныя точки и плоскости, проходящія черезъ нихъ	46
Построеніе изображеній при помощи кардинальныхъ точекъ	50
Сведеніе двухъ оптическихъ системъ къ одной сложной оптиче- ской системѣ.	51
Телескопическая система	54
Сведеніе нѣсколькихъ оптическихъ системъ къ одной. Система, состоящая изъ двухъ сферич. преломляющихъ поверхностей	60

Линзы (чечевицы)	63
Изображенія, производимыя линзами. Частные случаи линз	65
Идеальныя линзы	69
Черченіе изображеній, образуемыхъ идеальною линзою. Система, составленная изъ двухъ линзъ	70
Недостатки, являющіеся въ изображеніи, если не ограничиваться одними только центральными лучами. Сферическая абберрація	71
Изображеніе весьма малаго предмета въ случаѣ, когда на систему изъ каждой точки предмета падаетъ широкій коническій пучекъ лучей. Апланатическая система и апланатическія точки преломляющей сферической поверхности	77
Астигматизмъ	87
Происхожденіе изображенія обширнаго предмета при помощи весьма узкаго пучка лучей и являющіеся при этомъ недостатки: астигматизмъ, искривленіе плоскости изображенія и отсутствіе въ изображеніи подобія предмету (искривленіе прямыхъ линій)	90
Нѣкоторыя замѣчанія о системѣ, дающей изображеніе обширнаго предмета при помощи широкаго пучка. Недостатокъ — „кома“.	94
Разложеніе свѣта на цвѣта или дисперсія (хроматизмъ)	97
Недостатки, являющіеся въ изображеніи вслѣдствіе разложенія свѣта на цвѣта.	
Общія замѣчанія о вліяніи дисперсіи на изображенія. Хроматическая разница мѣста и хроматическая разница увеличенія	99
Хроматическая абберрація	101
Условіе полнаго ахроматизма для центральныхъ лучей. Ахроматическій объективъ	103
Вторичный спектръ и его уничтоженіе	107
Выборъ цвѣтовъ для соединенія	110
Выводъ условій для устройства окуляра или луны	111
Хроматическая разница сферической абберраціи	114
Измѣненіе отношенія синусовъ съ измѣненіемъ цвѣта	115

Глава II. Нѣкоторыя замѣчанія о вычисленіи и конструкціи объективовъ.

Объективы для телескоповъ	116
Объективы для микроскоповъ	129
Фотографическіе объективы. Опредѣленіе	153
Глубина изображенія	154
Свѣтосила фотографическаго объектива и значеніе діафрагмы	157
Главнѣйшіе типы фотографическихъ объективовъ. Общія замѣчанія	160
Ахроматъ (старый и новый)	162
Анастигматы	166
Двойные симметрическіе объективы. (Апланаты)	169
Анастигматапланаты. (Двойной симметрической анастигматъ)	170
Портретный объективъ	172
Опредѣленіе нѣкоторыхъ постоянныхъ фотографическаго объектива.	

	<i>Стр.</i>
А. Опредѣленіе фокуснаго разстоянія фотографич. объектива	172
В. Опредѣленіе дѣйствующаго отверстія объектива	173
С. Опредѣленіе угла, обнимаемаго фотографическимъ объективомъ	174
Испытаніе фотографическихъ объективовъ.	
А. Обнаруженіе химическаго фокуса	174
В. Обнаруженіе присутствія астигматизма	175
С. Обнаруженіе дисторціи (отсутствія подобія)	175
Глава III. Общія замѣчанія объ оптическихъ инструментахъ.	
Ограниченіе лучей. (Входной и выходной зрѣчки, діафрагма поля зрѣнія, уголъ поля зрѣнія, предметный уголъ, угловое отверстіе системы).	176 — 182
Глазная точка, глазной (окулярный) кругъ или окулярное кольцо Рамсдена	182
Нумерическая апертура	183
Видимый діаметръ и увеличеніе	188
Нѣкоторыя замѣчанія изъ теоріи волнообразнаго движенія эфира	192
Яркость предмета и изображенія и связь между яркостью и увеличеніемъ. Нормальное увеличеніе	198
Вторичное изображеніе	205
Границы оптическаго наблюденія. (Воспроизводительная способность микроскопа)	214
Критическое увеличеніе микроскопа.	217
Глава IV. Микроскопъ.	
Общія замѣчанія. (Описаніе микроскопа. Ходъ и ограниченіе лучей).	220 — 226
Освѣтительный аппаратъ	226
Покровное стекло и иммерсія.	229
Опредѣленіе оптическихъ постоянныхъ микроскопа.	
Опредѣленіе фокусовъ и фокусныхъ разстояній объектива и окуляра	231
Увеличеніе микроскопа.	234
Опредѣленіе нумерической апертуры	237
Испытаніе микроскопа въ отношеніи коррекціи	239
Испытаніе микроскопа относительно его воспроизводительной способности	241
Испытаніе микроскопа въ отношеніи ортоскопичности	241
Микрофотографія	242
Глава V. Телескопъ.	
Дѣйствіе телескопа. Ходъ и ограниченіе лучей въ телескопѣ	244
Увеличеніе телескопа	246
Поле зрѣнія. Замѣчанія объ ортоскопичности телескопа и яркости изображенія. Труба телескопа	250
Испытаніе телескопа	251
Окуляры	253
Окуляръ Гюйгенса	255
Окуляръ Рамсдена	258

Земной окуляр	259
Чернение, соединеніе выдвигающихъ трубокъ	267

Глава VI. Оптическая техника.

Приготовление линзъ	
Предварительныя замѣчанія. (Токарный станокъ).	269
Общія замѣчанія объ изготовленіи оптическихъ системъ	270
Предварительная грубая обработка стекла	271
Приготовление шлифовальныхъ формъ. Сферометръ	273
Шлифованіе линзъ	284
Центрированіе линзъ	293
Приготовленіе крокуса для полированія линзъ	296
Приготовленіе полировального слоя	298
Полированіе линзъ	300
Испытаніе линзъ	303
Приготовленіе очень малыхъ линзъ для микроскопа	304
Склеиваніе линзъ	308
Закрѣпленіе небольшихъ линзъ въ оправу	309
Чистка стеколъ, закрѣпленіе паутинныхъ нитей въ окуляръ	311
Наводка зеркаль	312

ЗАМѢЧЕННЫЯ ПОГРѢШНОСТИ.

Стр.	Строка:	Напечатано:	Должно быть:
5	5 стр.	$\frac{LC}{LC'} \cdot \frac{L'S}{LS} = \frac{n'}{n}$	$\frac{LC}{L'C'} \cdot \frac{L'S}{LS} = \frac{n'}{n}$
23	7 стр.	прямой	прямой
35	15 стр.	F'	F' .
35	3 стр.	высоотъ	высотъ
46	8 стр.	$-\frac{x'}{x}$	$-\frac{x'}{x}$.
46	11 стр.	$-\frac{x'}{x}$	$-\frac{x'}{x}$.
77	3 стр.	касается	касается
82	20 стр.	фиг,	фиг.
88	4 стр.	сферическая	сферическая
94	4 стр.	$\frac{\text{tg } u_0'}{\text{tg } u_0'}$	$\frac{\text{tg } u_0'}{\text{tg } u_0}$
125	1 стр.	$\sin \lambda_2$	$\lg \sin \lambda_2$
126	1 стр.	№ 1	№
126	3 стр.	$\sin \phi_2$	$\lg \sin \phi_2$
144	1 стр.	№ 1	№
152	<i>Въ столбцѣ для данныхъ подѣ № 3 должно быть L_2 вмѣсто напечатаннаго L</i>		
208	13 стр.	$CC' = l$	$L'C' = l$
247	10 стр.	слѣдовъ	слѣдовательно
256	3 стр.	$S_1L' = -\frac{f}{2}$	$S_1L' = \frac{f}{2}$
277	16 стр.	обливъ	обмывъ
278	20 стр.	и вращать до	и вращать винтъ до
287	<i>На черт. (фиг. 177) буква N должна быть нѣсколько ниже.</i>		
290	3 стр.	вертелась	вертѣлась

ПРЕДИСЛОВІЕ.

Меня часто мучило любопытство узнать, какъ дѣлаются объективы да и вообще оптическіе приборы, какъ напр. телескопъ. Къ сожалѣнію въ русской литературѣ я не нашелъ такихъ сочиненій, которыя могли бы удовлетворить упомянутое мое любопытство. Но тѣмъ не менѣе кончилось тѣмъ, что я рѣшился попробовать самому устроить телескопъ. Мнѣ съ перваго разу это даже не представлялось особенно труднымъ. Я исходилъ изъ той точки зрѣнія, что вѣдь телескопъ Галилея состоялъ изъ простыхъ двухъ стеколъ, а все-таки при помощи этого телескопа Галилею первому удалось замѣтить фазы планеты венеры, открыть горы на лунѣ и др. Вотъ я и задумалъ приготовить прежде всего собирательную линзу съ длиннымъ фокуснымъ разстояніемъ, чтобы въ будущемъ примѣнить ее, какъ объективъ, для своего телескопа. Чтобы познакомиться съ обработкою стекла, я побывалъ на обыкновенномъ стекляномъ заводѣ и вернувшись домой, устроилъ соответствующія приспособленія, при помощи которыхъ и сталъ готовить объективъ. Матеріаломъ для объектива служила пластинка зеркальнаго стекла. Приготовление объектива продолжалось нѣсколько мѣсяцевъ. Помню, съ какимъ нетерпѣніемъ ждалъ я каникулъ, чтобы въ свободное время испытать свой объективъ. Но когда настало это время и я подвергъ испытанію свой объективъ, то я наглядно убѣдился, что онъ ни къ чему не былъ годенъ, и я пришелъ къ заключенію, что мнѣ не слѣдуетъ братьяся за подобное дѣло. Потомъ, спустя нѣсколько лѣтъ, я узналъ о вышедшемъ изъ печати сочиненіи: „Theorie der optischen Instrumente. Dr. Czapski. 1893. Я немедленно приобрѣлъ это сочиненіе. Оно написано очень сжато, такъ-что я, не прочитавъ и половины его, утомился и оставилъ дальнѣйшее чтеніе, твердо порѣшивъ никогда не заниматься этимъ вопросомъ. Про-

шло нѣкоторое время и мнѣ случайно попало въ руки сочиненіе: *Lehrbuch der Physik und Meteorologie Müller — Pouillet's*. (Neunte umgearbeitete und vermehrte Auflage v. L. Pfaunder) 1897. Я сталъ читать это сочиненіе, увлекся имъ и, прочитывая оптику, я достаточно выяснилъ себѣ теоретическую сторону интересующаго меня вопроса, и мнѣ выяснился тотъ путь, по которому надо слѣдовать, чтобы устроить объективъ. Потомъ я приобрѣлъ сочиненіе: *Lehrbuch der Optik*. F. Meisel. 1889, въ которомъ нашелъ выясненіе того же вопроса съ практической стороны, т. е. благодаря этому сочиненію, я составилъ себѣ достаточное представленіе о томъ, какъ шлифуютъ и полируютъ оптическія стекла, какъ ихъ центрируютъ и закрѣпляютъ въ оправу. Съ тѣхъ поръ я сталъ усиленно изучать способъ приготовленія вообще оптическихъ системъ и въ результатѣ задумалъ приготовить надлежащій объективъ для телескопа. Рѣшеніе этой задачи хотя и отняло у меня много времени, но было мною выполнено съ успѣхомъ. Стекла были выписаны отъ Шотта изъ Іены: одно — Crown 0.60, а другое Flint 0.93. Сначала были вычислены радіусы сферическихъ поверхностей каждой линзы, а затѣмъ на самомъ дѣлѣ были отшлифованы и отполированы поверхности обѣихъ линзъ, входящихъ въ составъ объектива.

Потомъ мнѣ удалось вычислить и на самомъ дѣлѣ приготовить объективъ для микроскопа. Какъ это дѣлалось и съ какимъ успѣхомъ, объ этомъ изложено въ этомъ сочиненіи.

Потрудившись весьма много надъ изученіемъ способа готовить оптическія системы, я и задумалъ написать это сочиненіе. Такая мысль поддерживалась во мнѣ тѣмъ обстоятельствомъ, что на русскомъ языкѣ я не находилъ подобнаго сочиненія. Цѣль этого сочиненія — познакомить читателя со способомъ изготовленія оптическихъ системъ.

Когда я обращался къ нѣкоторымъ лицамъ съ просьбою помочь мнѣ при изданіи этого сочиненія, то прежде всего спрашивали меня, самостоятельно-ли оно. Вопросы, задѣваемые въ этомъ сочиненіи, рѣшались вѣками и рѣшались не однимъ лицомъ, а многими; слѣдовательно нельзя требовать, чтобы подобное сочиненіе было вполне самостоятельнымъ. Внимательному читателю легко будетъ замѣтить, что въ моемъ сочиненіи самостоятельное, а что нѣтъ.

Что касается апланатическихъ системъ, то насколько мнѣ извѣстно, только для случая, когда одна изъ сопряженныхъ точекъ въ бесконечности, доказано, что точки пересѣченія сопряженныхъ лучей лежатъ на сферической поверхности. Мнѣ уда-

лось обобщить это положеніе и доказать, что всегда, если система апланатическая, то точки пересѣченія сопряженныхъ лучей лежатъ на сферической поверхности. Объ этомъ говорится въ § 35.

Въ § 48 помѣщены результаты моихъ вычисленій объектива для телескопа, а въ § 49 помѣщены результаты моихъ вычисленій объектива для микроскопа. При помощи послѣдняго объектива я произвелъ микрофотографическій снимокъ съ оболочки глаза мухи. Этотъ снимокъ отпечатанъ на страницѣ 243. Въ томъ же параграфѣ 49 читатель найдетъ описаніе придуманнаго мною прибора, при помощи котораго въ короткій промежутокъ времени можно опредѣлять путь для многихъ лучей послѣ ихъ преломленія.

Во всемъ сочиненіи я старался сдѣлать изложеніе даже весьма трудныхъ вопросовъ по возможности болѣе доступнымъ читателю, сохраняя въ то же время и строгую систематичность въ выводахъ разныхъ положеній.

Мое сочиненіе состоитъ изъ шести главъ. Первая глава содержитъ выводъ тѣхъ формулъ и положеній, которыя нужны для дальнѣйшихъ разсужденій. Вторая глава содержитъ статью о вычисленіи и конструкціи объективовъ. Въ той же главѣ приведены численные данныя для построенія главнѣйшихъ типовъ объективовъ для телескопа, микроскопа и фотографіи. Въ третьей главѣ изложены общія замѣчанія объ оптическихъ инструментахъ. Эти замѣчанія важны особенно для теоріи микроскопа и телескопа; поэтому эти замѣчанія предшествуютъ четвертой главѣ, содержащей теорію микроскопа, и пятой, — содержащей теорію телескопа. Въ пятой главѣ также говорится о конструкціи окуляровъ. Послѣдняя (шестая) глава содержитъ оптическую технику, гдѣ излагается способъ приготовленія оптическихъ системъ. Въ послѣдней главѣ довольно обстоятельно говорится о шлифованіи, полированіи, центрированіи, склеиваніи и оправѣ линзъ. Такимъ образомъ въ первыхъ пяти главахъ изложена теорія оптическихъ системъ, а въ дополненіе къ этой теоріи — въ пятой главѣ изложена практическая сторона вопроса, т. е. выясненъ способъ изготовлять оптическія системы изъ даннаго матеріала.

При изложеніи для меня служили пособиями слѣдующія сочиненія.

1. Lehrbuch der Physik und Meteorologie. Müller — Pouillet's. 1897,
2. Lehrbuch der Optik. F. Meisel. 1889,
3. Theorie der optischen Instrumente. v. Dr. S. Czapski. 1893,
4. Lehrbuch der geometrischen Optik. Dr. A. Gleichen. 1902,

5. Die photographischen Objective. Dr. J. M. Eder. 1891,
6. Handbuch der praktischen Optik. A. Steinheil und E. Voit,
7. Grundzüge der allgemeinen Mikroskopie v. Dr. L. Dippel. 1885,
8. Die Brillen..... Dr. C. Neumann,
9. Cours de Physique. J. Violle. 1892,
10. Микроскопъ. Др. Циммерманъ. — Переводъ Др. Ильиша. 1896,
11. Курсъ физики. О. Д. Хвольсонъ. (1897 — 1899),
12. Курсъ опытной физики. А. П. Шимковъ. (1883 — 1888),
13. Фотографическая оптика. Составлено по А. Сорэ
- и 14. Энциклопедическій словарь. Ф. А. Брокгаузъ — И. А. Ефронъ.

При изложеніи геометрической оптики я близко придерживался перваго изъ упомянутыхъ сочиненій.

Логарифмическія вычисленія велись по способу, указываемому въ курсѣ алгебры г. Киселева.

Если бы чтеніе формулъ для читателя оказалось по чему либо затруднительнымъ, то онъ можетъ ограничиться лишь прочтеніемъ окончательныхъ выводовъ и положеній, которыя напечатаны курсивымъ шрифтомъ.

Передъ чтеніемъ необходимо исправить ошибки, которыя указаны сейчасъ же послѣ оглавленія. Особенно необходимо исправить ошибки на стр. 5, 208 и 278.

Въ заключеніе замѣчу, что на это счиненіе я посвятилъ лучшіе годы своей жизни и потратилъ всѣ свои сбереженія, не рассчитывая, конечно, на какую нибудь выгоду отъ изданія сего сочиненія.

С. Б. Процевичъ.

ГЛАВА I.

Геометрическая оптика.

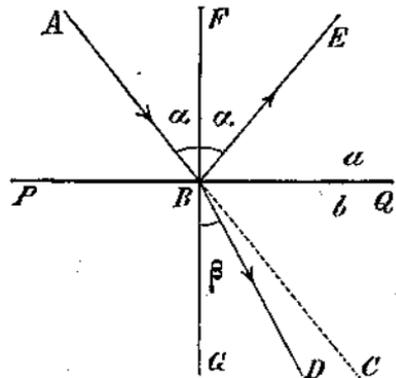
§ 1. Предварительныя замѣчанія. Изъ физики извѣстно, что въ однородной среднѣ свѣтъ распространяется прямолинейно и прямая, по которой распространяется свѣтъ, называется *свѣтовымъ лучемъ* или просто *лучемъ*.

Если лучъ свѣта достигаетъ поверхности, разграничивающей двѣ средины, то онъ частью отражается, а частью проникаетъ въ другую средину, причемъ входя въ другую средину, онъ измѣняетъ свое первоначальное направленіе или, какъ говорятъ, *преломляется*.

Представимъ себѣ двѣ средины a и b , разграниченныя поверхностью PQ (фиг. 1). Поверхность, разграничивающую двѣ средины, будемъ часто называть *преломляющею поверхностью*.

Пусть въ точку B падаетъ свѣтовой лучъ AB . Достигнувъ точки B , лучъ частью отразится и пойдетъ по линіи BE , причемъ $\angle ABF = \angle FBE$, а частью преломится и пойдетъ по линіи BD , отклонившись отъ первоначальнаго направленія ABC .

Перпендикуляръ FB , возставленный къ преломляющей поверхности PQ въ точкѣ B , называется *перпендикуляромъ паденія*. Уголь, составленный падающимъ лучемъ AB съ перпендикуляромъ паденія, т. е. уголь ABF называется *угломъ паденія*, а уголь, составленный преломленнымъ лучемъ BD съ продолженіемъ упомянутого перпендикуляра, т. е. уголь GBD , называется *угломъ преломленія*.



фиг. 1.

Для краткости рѣчи назовемъ уголъ ABF буквою α , а уголъ GBD —буквою β .

Относительное положеніе падающаго и преломленнаго лучей опредѣляется по слѣдующимъ законамъ, называемымъ *законами преломленія свѣта*:

1. Падающій лучъ AB и преломленный BD лежатъ въ одной плоскости съ перпендикуляромъ паденія FG , причемъ падающій и преломленный лучи располагаются по разнымъ сторонамъ этого перпендикуляра: На чертежѣ (фиг. 1) стрѣлки показываютъ направленіе свѣта.

2. Для всякихъ двухъ срединъ отношеніе синуса угла паденія къ синусу угла преломленія есть величина постоянная и называется *относительнымъ показателемъ преломленія*.

Въ нашемъ случаѣ показатель преломленія срединъ b по отношенію къ срединѣ a выразится дробью $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ и на основаніи сказаннаго $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{постоянной величинѣ}$. Вообще отношеніе синуса угла паденія къ синусу угла преломленія называется показателемъ преломленія той средины, въ которую лучъ входитъ, по отношенію къ той, изъ которой выходитъ.

Если свѣтъ переходитъ изъ пустоты (эфира) въ какуюнибудь средину, то отношеніе синуса угла паденія къ синусу угла преломленія называется *абсолютнымъ показателемъ преломленія* средины.

Свѣтовой лучъ, переходя изъ одной средины въ другую, преломляется, приближаясь къ перпендикуляру или удаляясь отъ него. Сообразно съ этимъ мы вторую средину сравнительно съ первой называемъ *оптически болѣе плотною* или менѣе плотною.

3. Если свѣтовой лучъ AB (фиг. 1) переходитъ изъ средины a въ средину b и принимаетъ въ срединѣ b направленіе BD , то обратно: свѣтовой лучъ, идущій во второй срединѣ b по DB въ направленіи отъ D къ B , при переходѣ въ первую средину a , принимаетъ въ ней направленіе по прямой BA отъ B къ A ; такъ что, если въ первомъ случаѣ уголъ паденія былъ уголъ α , а уголъ преломленія былъ уголъ β , то въ послѣднемъ случаѣ уголъ β будетъ служить угломъ паденія, а уголъ α —угломъ преломленія, т. е. углы α и β поменяются своими ролями.

Обозначимъ относительный показатель преломленія двухъ срединъ a и b черезъ n_{ab} , если свѣтъ идетъ изъ средины a въ средину b , и черезъ n_{ba} , если свѣтъ идетъ изъ средины b въ средину a ; тогда

$$n_{ab} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \text{ и } n_{ba} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}, \text{ откуда}$$

$$\text{получимъ, что } n_{ab} \cdot n_{ba} = 1 \dots \dots \dots (1)$$

Доказано опытами (Фуко), что относительный показатель двух срединъ a и b равняется отношенію скоростей свѣта въ этихъ срединахъ. Поэтому, если v_a означаетъ скорость свѣта въ срединѣ a , а v_b — въ срединѣ b , то

$$n_{ab} = \frac{v_a}{v_b} \dots \dots \dots (2)$$

Если v означаетъ скорость свѣта въ пустотѣ, а n_a и n_b соответственно означаютъ абсолютные показатели срединъ a и b , то

$$n_a = \frac{v}{v_a}, \quad n_b = \frac{v}{v_b},$$

раздѣливъ послѣднее равенство на предпослѣднее, найдемъ, что

$$\frac{v_a}{v_b} = \frac{n_b}{n_a},$$

а въ силу равенства (2) получимъ, что

$$n_{ab} = \frac{n_b}{n_a} \dots \dots \dots (3)$$

т. е. показатель преломленія средины b по отношенію къ срединѣ a равняется абсолютному показателю преломленія средины b , дѣленному на абсолютный показатель преломленія средины a ,

по $n_{ab} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$; слѣдовательно

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_b}{n_a}, \text{ откуда имѣемъ равенство}$$

$$n_a \sin \alpha = n_b \sin \beta \dots \dots \dots (4)$$

Это равенство (4) весьма важно для дальнѣйшихъ нашихъ разсужденій.

Примѣчаніе. Законы отраженія могутъ получаться, какъ частный случай, изъ законовъ преломленія, стоитъ только принять $n_a = -n_b$, тогда изъ форм. (4) будетъ слѣдовать, что $\sin \alpha = -\sin \beta$, или что $\alpha = -\beta$, т. е. свѣтовой лучъ возвращается въ ту же средину, отклоняясь отъ перпендикуляра на уголъ равный углу паденія, но уголъ этотъ, какъ отрицательный, долженъ считываться отъ перпендикуляра въ сторону обратную съ угломъ паденія, т. е. отраженный лучъ располагается не по ту сторону, что и падающій лучъ, а по другую сторону отъ перпендикуляра паденія.

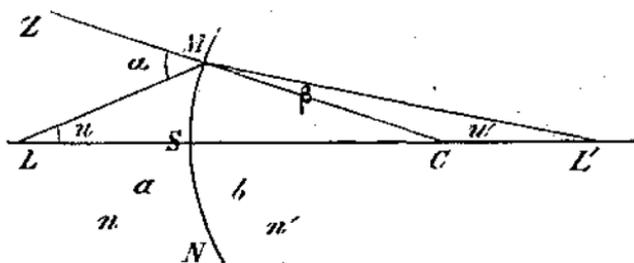
На основаніи сдѣланнаго примѣчанія мы будемъ въ состояніи формулы, выведенныя для преломленія свѣта, примѣнять и для отраженія, принимая въ нихъ $n_a = -n_b$.

Замѣтимъ еще, что если свѣтовой лучъ падаетъ на преломляющую поверхность нормально, то онъ, входя въ другую средину, не преломляется, а продолжаетъ свой путь по той же нормали, по которой упалъ на преломляющую поверхность.

Ходъ луча при преломленіи его сферическими поверхностями.

§ 2. **Переходъ луча черезъ одну преломляющую сферическую поверхность.** Представимъ себѣ двѣ средины a и b , абсолютные показатели преломленія которыхъ соответственно суть n и n' (фиг. 2). Положимъ, что эти двѣ средины разграничены сферической поверхностью MN , центръ которой находится въ точкѣ C . Пусть въ L находится свѣтящаяся точка, испускающая на преломляющую поверхность MN свѣтовые лучи.

Насъ интересуетъ вопросъ, будутъ-ли означенные лучи послѣ преломленія сходиться въ одной точкѣ. Соединимъ точку L съ цен-



фиг. 2.

тромъ C прямою LC . Прямая LC , продолженная въ мысли безиррадиально въ обѣ стороны, называется *осью* преломляющей поверхности MN . Ось пересѣкаетъ сферическую поверхность MN въ некоторой точкѣ S , которую будемъ называть *вершиною* сферической поверхности. Очевидно, что ось представляетъ нормаль къ поверхности MN въ точкѣ S . Лучъ, идущій по оси изъ L въ точку S , войдетъ во вторую средину b безъ преломленія. Возьмемъ теперь другой лучъ, идущій въ плоскости чертежа изъ точки L въ какую нибудь точку M . Проведемъ изъ центра C въ точку M радиусъ CM и продолжимъ его дальше, напрямѣръ до Z .

Прямая ZC представляетъ для луча LM ничто иное, какъ перпендикуляръ паденія. На основаніи закона преломленія (пунктъ 1, § 1) заключаемъ, что преломленный лучъ ML' , соответствующій падающему лучу LM , будетъ находится въ плоскости LMC и слѣдовательно онъ пересѣчетъ ось въ некоторой точкѣ, которую назовемъ буквою L' . Угль паденія LMZ обозначимъ буквою α , а угль преломле-

нія CML' буквою β ; тогда можетъ написать равенство:

$$n \sin \alpha = n' \sin \beta \dots \dots \dots (1),$$

изъ котораго можемъ опредѣлить уголъ β .

Далѣе, обозначимъ углы, которые образуютъ съ осью LC падающій и преломленный лучи, соответственно буквами u и u' . Изъ треугольника LMC находимъ, что

$$\frac{\sin LMC}{\sin MLC} = \frac{LC}{MC};$$

но такъ какъ $\sin LMC = \sin LMZ = \sin \alpha$ и $\sin MLC = \sin u$, то вмѣсто предыдущей пропорціи напишемъ:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin u} = \frac{LC}{MC}.$$

Затѣмъ, изъ треугольника CML' находимъ, что

$$\frac{\sin u'}{\sin \beta} = \frac{MC}{L'C}.$$

Перемноживъ двѣ послѣднія пропорціи и принявъ во вниманіе равенство (1), находимъ, что

$$\frac{LC}{L'C} = \frac{n'}{n} \cdot \frac{\sin u'}{\sin u} \dots \dots \dots (2)$$

Изъ $\triangle LML'$ слѣдуетъ, что

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{LM}{L'M}.$$

Подставляя это значеніе для $\frac{\sin u'}{\sin u}$ въ равенство (2), находимъ, что

$$\begin{aligned} \frac{LC}{L'C} &= \frac{n'}{n} \cdot \frac{LM}{L'M} \text{ или} \\ \frac{LC}{L'C} \cdot \frac{L'M}{LM} &= \frac{n'}{n} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

Представимъ себѣ теперь, что уголъ u весьма малъ, иначе говоря, что точка M находится весьма недалеко отъ точки S ; тогда безъ значительной погрѣшности можемъ принять, что $LM = LS$ и $L'M = L'S$, и наше равенство (3) замѣнится такимъ.

$$\frac{LC}{EC} \cdot \frac{L'S}{LS} = \frac{n'}{n} \dots \dots \dots (4)$$

Будемъ помнить, что уравненіе (4) принимается лишь для лучей, выходящихъ изъ точки L подъ весьма малымъ угломъ u . Такіе лучи будемъ называть *центральными*. Вообще центральными лучами будемъ называть такіе лучи, которые образуютъ съ осью весьма ма-

тые углы и падают на поверхность весьма недалеко от оси. В случае, если бы на поверхность MN (фиг. 2) падали лучи, параллельные оси LL' , то тѣ изъ нихъ считались бы центральными, которые падали бы на озапаченную поверхность весьма недалеко отъ вершины S . Такъ-что центральные лучи характерны уже тѣмъ, что они почти нормальны къ своей преломляющей поверхности.

Для достиженія большаго обобщенія мы будемъ считать положительными всѣ отрезки, расположенные на оси вправо отъ вершины S , а отрезки, расположенные отъ той же вершины S влево,—отрицательными. Въ виду этого вводимъ слѣдующія обозначенія:

$$\begin{aligned} LS &= -s \\ L'S &= +s' \\ SC &= +r \end{aligned}$$

Тогда $LC = LS + SC = -s + r^*)$, $L'C = L'S - SC = s' - r$ и уравненіе (4) приметъ теперь такой видъ:

$$\frac{r-s}{s'-r} \cdot \frac{s'}{-s} = \frac{n'}{n} \dots \dots \dots (4a),$$

а послѣ преобразованія получимъ такое равенство:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n'-n}{r} \dots \dots \dots (5)$$

Въ уравненіе (5) не входятъ углы u и u' .

Если на оси взята опредѣленная свѣтящаяся точка L (фиг. 2), то этимъ уже опредѣлено значеніе s , а коль скоро r извѣстно, мы изъ уравненія (5) найдемъ опредѣленное значеніе для s' , которое не будетъ зависетьъ отъ угла u или, иначе говоря, отъ положенія точки M на преломляющей поверхности; слѣдовательно центральные лучи, которые посылаетъ на преломляющую поверхность точка L , послѣ преломленія переѣкаютъ ось на одинаковомъ разстояніи s' отъ вершины S .

Мы говорили до сихъ поръ о центральныхъ лучахъ, лежащихъ въ плоскости чертежа (фиг. 2), а собственно изъ точки L падаетъ на преломляющую поверхность нѣкоторый пучекъ центральныхъ лучей въ видѣ конуса (или цилиндра), расположенныхъ вокругъ оси LL' . Очевидно, что относительно всѣхъ этихъ центральныхъ лучей наши разсужденія сохраняютъ свою силу, потому что мы, не измѣняя разсужденій, можемъ взять за плоскость чертежа любую плос-

*) Обращаемъ вниманіе читателя на то, что въ нашемъ случаѣ согласно чертежу (фиг. 2) и сдѣланному условію подъ s понимается отрицательное число; слѣдов.— s обозначаетъ положительное число и представляетъ ничто иное, какъ величину отрезка LS .

кость, проходящую через ось LL' и пересекающую значительный конический (или цилиндрический) пучек и всегда для определенного положения L , т. е. для данного значения s будет получаться из ур. (5) определенное значение для s' , остающееся одним и тем же для всякого значения u , лишь бы только это u было весьма малым.

Таким образом получаемъ правило:

Центральные лучи, выходящие изъ свѣтящейся точки L , послѣ преломленія собираются опять въ одной точкѣ L' .

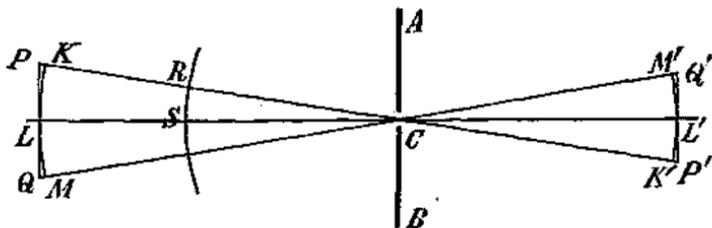
Точка L' называется *изображеніемъ* точки L , а свѣтящаяся точка L называется *предметомъ*.

Принимая во вниманіе законы преломленія (пунктъ 3, стр. 2), можемъ сказать, что если свѣтящаяся точка будетъ въ L' и будетъ изъ L' посылать центральные лучи на преломляющую поверхность MN , то они послѣ преломленія соберутся опять въ одной точкѣ и именно въ L .

Значитъ, точки L и L' обладаютъ взаимностью: если одна изъ нихъ служить предметомъ, то другая служитъ изображеніемъ его. Эти точки называются *сопряженными*. Очевидно, что сопряженные точки лежатъ на прямой, проходящей черезъ центръ C .

При дальнѣйшихъ разсужденіяхъ мы будемъ полагать, что свѣтъ идетъ слѣва направо, какъ предполагалось на фиг. 2. При такомъ условіи можемъ сказать, что каждая изъ величинъ s , s' и r будетъ считаться положительною, если она будетъ расположена отъ вершины S въ ту же сторону, въ какую движется свѣтъ, т. е. вправо, и отрицательною, если она будетъ расположена отъ вершины S въ обратную сторону движенія свѣта, т. е. влѣво.

§ 3. **Изображеніе свѣтящагося предмета.** Примѣнимъ предыдущія разсужденія къ случаю, когда вмѣсто свѣтящейся точки будетъ свѣтящійся предметъ, состоящій изъ свѣтящихся точекъ.



фиг. 3.

Пусть RS (фиг. 3) изображаетъ преломляющую сферическую поверхность, которой центръ въ C . Далѣе, пусть KLM представляетъ нѣкоторую сферическую поверхность, которой центръ тоже въ C . Допустимъ, что каждая точка сферической поверхности KLM испускаетъ по направленію къ центру C узкій пучекъ центральныхъ лу-

чей. Проведи через L и C прямую LC , мы такимъ образомъ получимъ для свѣтящейся точки L ось, на которой эта точка L дастъ изображеніе въ иѣкоторой точкѣ L' на разстояніи $s'—r$ отъ C . Значеніе s' найдется изъ уравненія (5) по данному s , опредѣляемому положеніемъ точки L . Возьмемъ на той же сферической поверхности KLM другую точку K и относительно K произведемъ тѣ же разсужденія, что и относительно L , т. е. проведемъ черезъ K и C прямую KC . Эта прямая будетъ представлять для точки K ось. Точка K послыасть по своей оси KC на преломляющую поверхность узкій пучекъ центральныхъ лучей, которые соберутся послѣ преломленія въ иѣкоторой точкѣ K' на такомъ же разстояніи $s'—r$ отъ C , на какомъ получилась точка L' , такъ какъ самы свѣтящіяся точки L и K отстоятъ отъ поверхности RS на одинаковомъ разстояніи s . Точки K и K' будутъ представлять собою двѣ сопряженныя точки.

Эти разсужденія даютъ намъ полное основаніе высказать слѣдующее правило:

Если свѣтящіяся точки лежатъ на одной сферической поверхности, то сопряженныя съ ними точки лежатъ на другой сферической поверхности и объ эти сферическія поверхности концентрическія съ преломляющею поверхностью, т. е. имѣють съ нею общій центръ C .

Поэтому для сферической поверхности KLM получается сопряженная съ нею сферическая поверхность $K'L'M'$.

Проведемъ черезъ L и L' касательныя плоскости PLQ и $P'L'Q'$, которыя, понятно, будутъ перпендикулярны къ прямой LL' , и продолжимъ линію KC въ обѣ стороны до пересѣченія съ этими плоскостями соответственно въ точкахъ P и P' .

Допустимъ, что уголъ KCM весьма малъ, тогда безъ значительной погрѣшности можемъ принять, что $KC=PC$ и $K'C=P'C$, т. е. можемъ считать весьма малыя сферическія поверхности KLM и $K'L'M'$ соответственно совпадающими съ упомянутыми касательными плоскостями. На основаніи сказаннаго получаемъ правило:

Незначительная часть плоскости, перпендикулярной къ оси, изобразится тоже въ видѣ плоскости, перпендикулярной къ той же оси. При этомъ каждыя двѣ сопряженныя точки этихъ плоскостей лежатъ на прямой, проходящей черезъ центръ преломляющей поверхности.

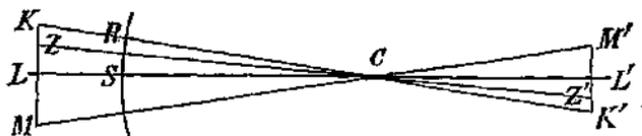
Такъ какъ означенныя плоскости состоятъ изъ соответственно сопряженныхъ точекъ, то сами эти плоскости суть *сопряженныя плоскости*, т. е. одна служитъ изображеніемъ другой.

Строго говоря, высказанное правило имѣеть мѣсто лишь въ предѣлѣ при безконечно маломъ углѣ KCM , но мы имѣемъ въ виду при мѣненіе своихъ разсужденій на практикѣ, гдѣ будемъ по неволѣ

ограничиваться приближенными выводами. Для насъ важно знать, что чѣмъ ближе будемъ подходить къ извѣстному предѣлу, тѣмъ совершеннѣе будутъ извѣстные результаты.

Когда мы говорили о свѣтящейся сферической поверхности, мы полагали, что каждая точка ея посылаетъ по своей оси къ центру весьма узкій пучокъ центральныхъ лучей. Не мѣшаетъ намъ замѣтить, что на практикѣ такое условіе можно было бы соблюсти, помѣщая перпендикулярно къ оси LL' (фиг. 3) непрозрачную пластинку AB съ весьма малымъ отверстіемъ и при томъ такъ, чтобы центръ C приходился въ отверстіи этой пластинки. Такая пластинка можетъ пропустить только узкій пучекъ лучей.

Представимъ себѣ (фиг. 4) преломляющую сферическую поверхность RS съ центромъ въ C . Далѣе пусть KM и $K'M'$ будутъ двѣ



фиг. 4.

сопряженныхъ плоскости, перпендикулярныя къ оси LL' . Само собою разумѣется, что уголъ KCM весьма малъ.

Возьмемъ въ плоскости KM любую точку Z , которая бы однако лежала въ плоскости чертежа; проведемъ черезъ Z и C прямую до пересѣченія съ плоскостью $K'M'$ въ некоторой точкѣ Z' . Точки Z и Z' суть сопряженные точки; ихъ разстоянія отъ оси LL' , т. е. линіи ZL и $Z'L'$ обозначимъ соответственно черезъ y и y' , при чемъ разстоянія y и y' будутъ считаться положительными или отрицательными, смотря по тому, будутъ ли они падъ осью LL' или подъ нею. Изъ подобія прямоугольныхъ треугольниковъ ZCL и $Z'CL'$ слѣдуетъ, что

$$\frac{Z'L'}{ZL} = \frac{L'C}{LC}$$

или (на основаніи сдѣланныхъ обозначеній)

$$\frac{-y'}{y} = \frac{s' - r}{r - s}$$

или

$$\frac{y'}{y} = \frac{s' - r}{s - r} \dots \dots \dots (6)$$

Замѣтимъ, что $-y'$ въ нашемъ случаѣ положительная величина, потому что само y' отрицательное.

Подъ s въ нашемъ случаѣ согласно принятымъ условіямъ понимается отрицательная величина.

Величины s и s' связаны между собою уравненіемъ (4а), которое однозначнее съ уравненіемъ (5).

На основаніи ур. (4а) равенство (6) преобразуется въ такое:

$$\frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{s'}{s} \dots \dots \dots (7)$$

Уравненіе (5) по данному s , т. е. по разстоянію плоскости предмета KM отъ поверх. S даетъ намъ возможность найти s' , т. е. разстояніе плоскости изображенія $K'M'$ отъ S ; а уравн. (7) по заданному y , т. е. по разстоянію точки предмета Z отъ оси LL' даетъ возможность опредѣлить y' , т. е. разстояніе отъ той же оси точки Z' , сопряженной съ Z и принадлежащей изображенію $K'M'$.

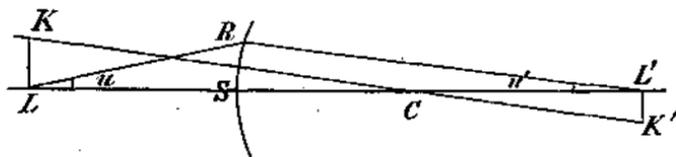
Замѣтимъ, что каждыя двѣ сопряженныя точки, какъ напр. Z и Z' (фиг. 4), находятся въ плоскости, проходящей через ось LL' . Первая точка Z опредѣляется координатами s и y , а сопряженная съ нею точка Z' — координатами s' и y' ; слѣдовательно уравн. (5) и (7) по заданному положенію предмета вполне опредѣляютъ положеніе изображенія этого предмета, если радиусъ преломляющей поверхности и показатели преломленія обѣихъ средъ извѣстны.

Отношеніе $\frac{y'}{y}$ называется *поперечнымъ увеличеніемъ* или *линейнымъ увеличеніемъ*, а иногда просто *увеличеніемъ*. Его будемъ обозначать чаще всего буквою B .

Изъ уравн. (7) видимъ, что это отношеніе остается постояннымъ, если $\frac{s'}{s}$ постоянно. Но для данныхъ двухъ сопряженныхъ плоскостей s и s' постоянны; поэтому имѣемъ правило:

Поперечное увеличеніе въ двухъ сопряженныхъ плоскостяхъ постоянно.

§ 4. **Связь между поперечнымъ и угловымъ увеличеніями.** Обратимъ вниманіе на то, что точки перпендикуляра $Z'L'$ (фиг. 4) суть сопряженныя съ точками перпендикуляра ZL ; поэтому приходимъ къ заключенію, что прямая, перпендикулярная къ оси LL' , изображается



фиг. 5.

тоже въ видѣ перпендикуляра къ той же оси и оба эти перпендикуляра лежатъ въ одной плоскости, опредѣляемой пересѣкающимися прямыми LL' и ZZ' . Означенные перпендикуляры суть сопряженные.

На чертежѣ (фиг. 5) прямая KL и $K'L'$ представляютъ два сопряженныхъ перпендикуляра къ оси LL' . Изъ точки L падаетъ лучъ

LR на преломляющую поверхность RS и послѣ преломленія опъ направляется по RL' . Предположимъ, что углы RLS , $RL'S$ и KCL весьма малы; тогда будемъ имѣть:

$$\operatorname{tg} RLS = \frac{RS}{LS} \text{ и } \operatorname{tg} RL'S = \frac{RS}{L'S},$$

откуда находимъ, что

$$\frac{\operatorname{tg} RL'S}{\operatorname{tg} RLS} = \frac{LS}{L'S}.$$

Обозначимъ уголь RLS черезъ u , а уголь $RL'S$ черезъ u' . Угли u и u' будемъ называть *наклоненіями луча*, при чемъ условимся считать каждый изъ нихъ положительнымъ въ томъ случаѣ, если лучъ (или его продолженіе) долженъ двигаться вокругъ вершины угла по направленію движенія часовой стрѣлки, пробѣгая по пространству угла, чтобы совпасть съ осью LL' , а въ противномъ случаѣ, уголь отрицательный.

Такимъ образомъ въ нашемъ случаѣ $< u$ нужно считать положительнымъ, а $< u'$ — отрицательнымъ и послѣдняя пропорція напишется такъ:

$$\frac{\operatorname{tg} (-u')}{\operatorname{tg} u} = \frac{-s}{s'}$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{s}{s'} \dots \dots \dots (8)$$

Отношеніе $\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u}$, которое при весьма малыхъ углахъ u и u' можно замѣнить отношеніемъ $\frac{u'}{u}$, называется *угловымъ увеличеніемъ* для двухъ сопряженныхъ точекъ L и L' . Будемъ его обозначать буквою G .

На основаніи ур. (7) вмѣсто равенства (8) можемъ написать:

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{y}{y'} \cdot \frac{n}{n'},$$

откуда имѣемъ равенство:

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} \cdot \frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \dots \dots \dots (9)$$

Это равенство выражаетъ правило, что *произведеніе углового увеличенія на поперечное увеличеніе величина постоянная и равняется отношенію показателя преломленія первой среды къ показателю преломленія второй среды.*

Изъ уравн. (9) получаемъ:

$$y' \cdot n' \cdot \operatorname{tg} u' = y \cdot n \cdot \operatorname{tg} u \dots \dots \dots (10)$$

а такъ какъ n и n' весьма малыя, то можемъ написать

$$y' \cdot n' \cdot u' = y \cdot n \cdot u \dots \dots \dots (11)$$

§ 5. **Фокусы и фокусныя разстоянія.** Падающій лучъ и соответствующій ему преломленный лучъ, какъ наприм. LR и RL' (фиг. 5), иногда называютъ сопряженными лучами.

Представимъ себѣ случай, когда центральные лучи въ одной изъ двухъ срединъ идутъ параллельно осн, тогда есть точка, въ которой сходятся лучи, сопряженные съ параллельными. Эта точка называется *фокусомъ*.

Ниже представлены четыре возможныхъ случая (фиг. 6, 7, 8 и 9).

У преломляющей поверхности существуютъ два фокуса: *первый*, когда параллельные лучи идутъ во второй срединѣ, и *второй*, когда параллельные лучи идутъ въ первой срединѣ. На чертеж. (фиг. 7 и фиг. 9) точка F изображаетъ первый фокусъ, а на чертежахъ (фиг. 6 и фиг. 8) точка F' изображаетъ второй фокусъ. На чертежахъ (фиг. 6 и 7) фокусы *дѣйствительные*, потому что въ нихъ дѣйствительно сходятся лучи. Преломляющія поверхности, дающія дѣйствительные фокусы, называются *собирательными*. На двухъ остальныхъ чертежахъ въ фокусахъ сходятся лишь продолженія лучей. Такие фокусы называются *мнимыми*, а поверхности, дающія ихъ, называются *разсѣивательными*.

Въ теоріи и на практикѣ весьма важную роль играютъ разстоянія FS и $F'S$, которыя называются *фокусными разстояніями*. Ихъ мы обозначимъ соответственно черезъ f и f' . Они легко находятся изъ уравненія

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \dots \dots \dots (5),$$

если взять во вниманіе, что сопряженная съ фокусомъ точка находится на безконечно большомъ разстояніи отъ вершины S ; потому что параллельные лучи можемъ считать пересѣкающимися на безконечно большомъ разстояніи отъ S .

Принявъ въ ур. (5) $s' = \infty$, найдемъ разстояніе перваго фокуса F отъ S , а принявъ $s = \infty$, найдемъ разстояніе втораго фокуса F' отъ того же S . Принимая въ ур. (5) $s' = \infty$, мы должны въ тоже время принимать $s = f$ и получаемъ равенство.

$$\frac{n'}{\infty} - \frac{n}{f} = \frac{n' - n}{r} \text{ или } 0 - \frac{n}{f} = \frac{n' - n}{r},$$

откуда

$$f = - \frac{nr}{n' - n} \dots \dots \dots (12),$$

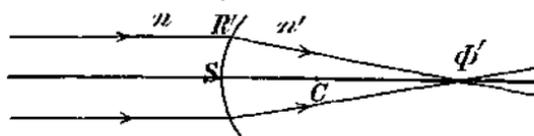
точно также найдемъ, что

$$f' = \frac{n'r}{n' - n} \dots \dots \dots (13)$$

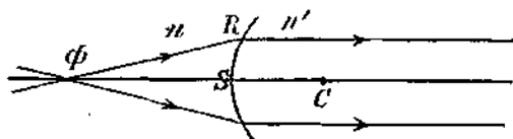
Изъ ур. (12 и 13) слѣдуетъ такое замѣчательное равенство:

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \dots \dots \dots (14)$$

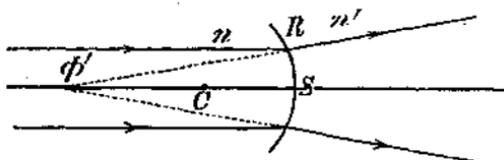
Это равенство показываетъ, что фокусныя разстоянія относятся, какъ показатели преломленія соответствующихъ средъ и имѣютъ обратные знаки, т. е. фокусы Φ и Φ' лежатъ по разнымъ сторонамъ отъ преломляющей поверхности.



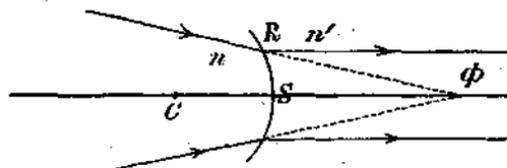
фиг. 6.



фиг. 7.



фиг. 8.



фиг. 9.

Стрѣлки на чертежахъ изображаютъ направленіе движенія свѣта.

Предположимъ, что на всѣхъ этихъ четырехъ чертежахъ налѣво отъ преломляющей поверхности воздухъ, а направо—обыкновенное стекло, тогда

$$\frac{n'}{n} = \frac{3}{2}.$$

Принимая во вниманіе, что

$$\frac{nr}{n'-n} = \frac{r}{\frac{n'}{n}-1} \quad \text{и} \quad \frac{n'r}{n'-n} = \frac{r}{1-\frac{n'}{n}}$$

находимъ, что при $\frac{n'}{n} = \frac{3}{2}$ уравненія (12), (13) и (14) замѣнятся такими:

$$\begin{aligned} f &= -2r \\ f' &= 3r \\ \frac{f'}{f} &= -\frac{3}{2} \end{aligned}$$

Положимъ, что абсолютная величина r равна 1 и применимъ полученные выводы къ каждому изъ четырехъ случаевъ (фиг. 6, 7, 8 и 9).

Такъ какъ въ первыхъ двухъ случаяхъ (фигуры 6 и 7) центръ C вправо отъ вершины S , то $r = +1$ и слѣдовательно $f' = +3$ и $f = -2$, т. е. второй фокусъ Φ' лежитъ вправо отъ вершины S на разстоянн трехъ радиусовъ, а первый фокусъ Φ лежитъ влѣво отъ S на разстоянн двухъ радиусовъ.

Такіе результаты мы получили для собирательной поверхности; тогда центръ C находится въ болѣе плотной среднѣ.

Теперь обратимся къ случаю разсѣивательной поверхности (фигуры 8 и 9); тогда центръ C лежитъ въ срединѣ менѣе плотной.

Такъ какъ теперь центръ лежитъ влѣво отъ вершины S , то $r = -1$; слѣдов.

$$f' = -3 \text{ и } f = 2,$$

т. е. второй фокусъ Φ' лежитъ влѣво отъ вершины S на разстоянн трехъ радиусовъ, а первый фокусъ Φ —вправо отъ S на разстоянн двухъ радиусовъ.

Потомъ мы будемъ фокусныя разстоянія отсчитывать отъ фокусовъ до вершины S , т. е. по направленіямъ, которыя обратны принятымъ нами, поэтому если отсчитанныя въ такомъ смыслѣ фокусныя разстоянія обозначимъ черезъ F и F' , то на основанн положеній, принятыхъ въ геометріи, найдемъ, что

$$F = -f \text{ и } F' = -f' \dots \dots \dots (15)$$

Это замѣчаніе намъ пригодится въ послѣдствіи.

§ 6. Упрощеніе уравненій для изображеній. Коль скоро мы ввели въ свои рассужденія f и f' , мы можемъ легко упростить ур. (5).

Умноживъ его на $\frac{r}{n'-n}$, получимъ

$$\frac{n'r}{n'-n} \cdot \frac{1}{s'} - \frac{nr}{n'-n} \cdot \frac{1}{s} = 1,$$

а на основанн равенствъ (12) и (13) получимъ:

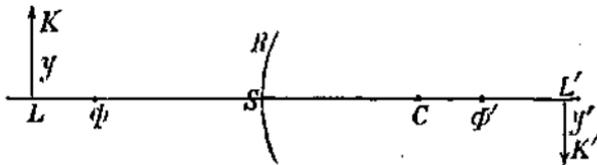
$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \dots \dots \dots (16)$$

Рѣшая это уравн. относительно s , а потомъ относительно s' , найдемъ поочередно слѣдующія два равенства:

$$s = \frac{fs'}{s' - f} \dots \dots \dots (17)$$

$$s' = \frac{f's}{s - f} \dots \dots \dots (18)$$

Весьма простой видъ получаютъ уравненія (5) и (7), если условиться разстоянiе предмета по оси LL' (фиг. 10) отсчитывать отъ перваго фокуса Φ , а разстоянiе изображенiя—отъ втораго фокуса Φ' ,



фиг. 10.

соблюдая при этомъ принятая условiя относительно знаковъ, т. е. считая положительными тѣ разстоянiя, которыя отсчитаны отъ фокусовъ по направленiю движенiя свѣта, т. е. вправо, а отрицательными отсчитанныя влѣво.

Пусть на чертежѣ (фиг. 10) RS по прежнему изображаетъ преломляющую поверхность съ центромъ въ C , Φ и Φ' —ея фокусы; прямая KL , перпендикулярная къ LL' , пусть представляетъ собою свѣтящiйся предметъ, а $K'L'$ —его озображенiе.

Изъ чертежа слѣдуетъ, что

$$\left. \begin{aligned} LS &= L\Phi + \Phi S \\ L'S &= L'\Phi' + \Phi'S \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (19)$$

Въ этихъ равенствахъ абсолютныя величины замѣнимъ количествами, т. е. числами со знаками. Для этой цѣли пишемъ:

$$\left. \begin{aligned} LS &= -s, & L'S &= s' \\ \Phi S &= -f, & \Phi'S &= f'. \end{aligned} \right.$$

Разстоянiе предмета KL отъ перваго фокуса Φ обозначимъ черезъ x , подъ которымъ согласно условiю и чертежу понимается отрицательное число; поэтому

$$L\Phi = -x.$$

Разстоянiе же изображенiя $K'L'$ отъ втораго фокуса Φ' обозначимъ черезъ x' , которое въ нашемъ случаѣ представляетъ собою положительное число; поэтому

$$L'\Phi' = x'.$$

На основаніи сдѣланныхъ обозначеній вмѣсто (19) получимъ та-
кія равенства:

$$\begin{aligned} -s &= -x - f \\ s' &= x' + f' \end{aligned}$$

или

$$\left. \begin{aligned} s &= x + f \\ s' &= x' + f' \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (20)$$

На основаніи уравненія (17) получимъ:

$$s - f = \frac{fs'}{s' - f'} - f$$

или

$$(s - f)(s' - f') = ff' \dots \dots \dots (21)$$

Подставляя въ это уравненіе вмѣсто s и s' ихъ значенія изъ
урав. (20), найдемъ

$$xx' = ff'$$

Мы имѣли:

$$\frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{s'}{s}$$

Послѣднее равенство на основаніи ур. (14) переписется такъ:

$$\frac{y'}{y} = -\frac{f}{f'} \cdot \frac{s'}{s}$$

Изъ урав. (20) слѣдуетъ, что

$$\begin{aligned} x &= s - f \\ x' &= s' - f' \end{aligned}$$

На основаніи послѣднихъ двухъ равенствъ уравненія (17) и (18)
преобразуются въ такія:

$$s = \frac{fs'}{x'}$$

$$s' = \frac{f's}{x}$$

или

$$\frac{s'}{s} = \frac{x'}{f}$$

$$\frac{s'}{s} = \frac{f'}{x}$$

Поэтому

$$\frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x}$$

Такимъ образомъ по n , n' и r мы при помощи уравн. (12) и (13)
вычислимъ f и f' , т. е. опредѣлимъ положеніе фокусовъ Φ и Φ' , отъ

которыхъ считаются x и x' ; а затѣмъ при помощи выведенныхъ уравненій

$$xx' = ff' \dots \dots \dots (22)$$

$$\text{и } \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{f'} = -\frac{f}{x} \dots \dots \dots (23)$$

по заданнымъ x и y найдемъ x' и y' , т. е. для каждой точки предмета найдемъ сопряженную съ нею точку изображенія, и обратно по заданнымъ x' и y' найдемъ x и y .

Если радиусъ сферической поверхности сдѣлается равнымъ ∞ , то сферическая поверхность обратится въ плоскость и вмѣсто уравненій (5) (7), (8), (12) и (13) получимъ при $r = \infty$ такія:

$$\left. \begin{aligned} \frac{s'}{s} &= \frac{n'}{n} \\ \frac{y'}{y} &= 1 \\ \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u} &= \frac{n}{n'} \\ f &= \infty \\ f' &= \infty \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (23a)$$

Последніе уравненія и представляютъ законы полученія изображенія **или** одной преломляющей плоскости.

§ 7 Полученіе уравненія для отраженія изъ уравненія для преломленія. Въ § 1, изложивъ законы преломленія, мы сдѣлали замѣчаніе, что законы отраженія получаются изъ законовъ преломленія, если принять, что $n = -n'$. Сдѣлаемъ примѣненіе этого замѣчанія. Мы имѣли уравненіе

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \dots \dots \dots (5)$$

Положимъ въ немъ $n = -n'$, тогда получимъ:

$$\frac{n'}{s'} + \frac{n'}{s} = \frac{n' + n'}{r}$$

или

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r},$$

что и составляетъ уравненіе для сферическихъ зеркалъ; а сдѣлавъ въ последнемъ уравненіи $r = \infty$, найдемъ уравненіе для плоскаго зеркала:

$$s = -s'$$

Но мы объ отраженіи не будемъ подробно говорить, такъ какъ насъ интересуетъ главнымъ образомъ преломленіе свѣта.

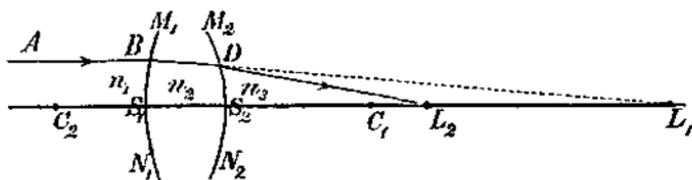
§ 8. Вычисленіе луча при прохожденіи его через преломляющія поверхности. Сдѣлаемъ предварительно одно замѣчаніе. Въ формулѣ

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \dots \dots \dots (5)$$

подъ n и n' понимаются абсолютные показатели преломленія двухъ срединъ, разгранпченныхъ преломляющею поверхностью съ радиусомъ r . Обозначимъ черезъ n_0 абсолютный показатель преломленія воздуха и раздѣливъ обѣ части равенства (5) на n_0 , мы получимъ:

$$\frac{\frac{n'}{n_0}}{s'} - \frac{\frac{n}{n_0}}{s} = \frac{\frac{n'}{n_0} - \frac{n}{n_0}}{r},$$

гдѣ $\frac{n}{n_0}$ и $\frac{n'}{n_0}$ суть показатели преломленія обѣихъ срединъ относительно воздуха (см. § 1, ур. (3)). Отсюда заключаемъ, что урав. (5) сохрпняетъ силу и въ томъ случаѣ, если абсолютные показатели преломленія замѣнить въ немъ относительными *).



фиг. 11.

Представимъ себѣ (фиг. 11) двѣ сферическія преломляющія поверхности M_1N_1 и M_2N_2 ; проведемъ черезъ ихъ центры C_1 и C_2 прямую C_2C_1 . Первая преломляющая поверхность M_1N_1 отдѣляетъ первую средину съ показателемъ преломленія n_1 отъ второй съ показателемъ преломленія n_2 , а вторая поверхность M_2N_2 отдѣляетъ вторую средину съ показателемъ n_2 отъ третьей средины съ показателемъ преломленія n_3 . Показатели преломленія n_1 , n_2 и n_3 пусть будутъ опредѣлены относительно воздуха. Въ этомъ параграфѣ наша задача состоитъ въ томъ, чтобы на численномъ примѣрѣ показать, какъ вычисляется путь центрального луча при переходѣ его черезъ преломляющія поверхности, при чемъ мы будемъ предполагать, что первая и третья средины представляютъ воздухъ, а вторая—стекло, котораго показатель преломленія относительно воздуха равенъ 1,5173; слѣдовательно мы можемъ написать $n_1 = n_3 = 1$ и $n_2 = 1,5173$.

Допустимъ, что въ первой срединѣ на преломляющую поверхность M_1N_1 падаетъ лучъ AB . Для упрощенія задачи допустимъ еще,

*) То же относится и къ основной формулѣ (4)—§ 1.

что лучъ AB параллеленъ линіи C_2C_1 *), причеъ точка B находится весьма близко отъ точки S_1 . Для вычисления центрального луча имѣемъ формулу (5). Эта формула (5) имѣетъ мѣсто для всякихъ двухъ прозрачныхъ однородныхъ средъ, разграниченныхъ сферической поверхностью съ радіусомъ r . Но въ случаѣ, когда имѣютъ въ виду много преломляющихъ сферическихъ поверхностей, то ищутъ эту формулу въ видѣ

$$\frac{n'_k}{s'_k} - \frac{n_k}{s_k} = \frac{n'_k - n_k}{r_k} \dots \dots \dots (24)$$

обозначая значкомъ k , къ какой именно преломляющей поверхности желаютъ отнести эту формулу. Подъ n_k и n'_k на основаніи сдѣланнаго въ началѣ этого параграфа замѣчанія будемъ понимать показатели преломленія относительно воздуха. Примѣняя формулу (24) къ первой преломляющей поверхности M_1N_1 , мы сдѣлаемъ $k = 1$ и перепишемъ ее въ такомъ видѣ:

$$\frac{n'_1}{s'_1} - \frac{n_1}{s_1} = \frac{n'_1 - n_1}{r_1}.$$

Такъ какъ по условію лучъ AB параллеленъ линіи C_2C_1 , то $s_1 = \infty$ и мы получимъ:

$$\frac{n'_1}{s'_1} - 0 = \frac{n'_1 - n_1}{r_1},$$

откуда имѣемъ:

$$\frac{1}{s'_1} = \frac{n'_1 - n_1}{r_1 n'_1}.$$

Что касается радіусовъ, то мы примемъ

- $r_1 = 1101$ мм. для перв. поверх. M_1N_1
- и $r_2 = -438$ мм. для втор. поверх. M_2N_2 .

Знакъ мм. означаетъ наименованіе „миллиметръ“.

Вычисленіе s'_1 .

Логарифмируя выраженіе для $\frac{1}{s'_1}$, получимъ:

$$\lg \frac{1}{s'_1} = \lg(n'_1 - n_1) - \lg r_1 - \lg n'_1.$$

Замѣчаемъ, что

$n'_1 = n_2 = 1,5173$	$\lg n'_1 = 0,18107$
$n'_1 - n_1 = 0,5173$	$\lg(n'_1 - n_1) = 1,71374$
$r_1 = 1101$	$\lg r_1 = 3,04179.$

*) Такое условіе допускается, когда свѣтящаяся точка, испускающая лучъ AB , находится на оси C_2C_1 весьма далеко отъ S_1 .

Слѣдовательно

$$\left. \begin{aligned} \lg(n_1' - n_1) &= 1,71374 \\ -\lg r_1 &= 4,95821 \\ -\lg n_1' &= 1,81893 \end{aligned} \right\} +$$

$$\lg \frac{1}{s_1'} = 4,49088 = -\lg s_1'$$

$$\lg s_1' = -4,49088 = 3,50912$$

$$s_1' = 3229,4.$$

Такимъ образомъ мы нашли, что лучъ AB послѣ преломленія первою поверхностью M_1N_1 пересѣчетъ ось C_2C_1 на разстоянн S_1 , $L_1 = s_1' = 3229,4$ мм.

Положимъ, что разстоянн $S_1S_2 = d = 5$ мм. тогда

$$S_2L_1 = S_1L_1 - S_1S_2 = s_1' - d = 3224,4 \text{ мм.}$$

Теперь приступаемъ къ дальнѣйшему вычисленію пути луча. Применяя формулу (24) ко второй поверхности, мы дѣлаемъ $k=2$ и получаемъ

$$\frac{n_2'}{s_2'} - \frac{n_2}{s_2} = \frac{n_2' - n_2}{r_2},$$

откуда

$$\frac{1}{s_2'} = \frac{n_2}{s_2} + \frac{n_2' - n_2}{r_2 n_2'}.$$

По отношенію ко второй поверхности M_2N_2 падающимъ лучемъ будетъ BD , продолженіе котораго пересѣкаетъ ось C_2C_1 на разстоянн $S_2L_1 = s_2$ отъ вершины S_2 ; поэтому $s_2 = 3224,4$ мм., причеиъ s_2 положительное, потому что оно расположено вправо отъ S_2 .

Замѣчаемъ, что

$$\begin{aligned} n_2' &= n_3 = 1 & \lg n_2 &= 0,18107 \\ n_2 &= 1,5173 & \lg [-(n_2' - n_2)] &= 1,71374 \\ n_2' - n_2 &= -0,5173 & \lg (-r_2) &= 2,64147 \\ r_2 &= -438 & \lg s_2 &= 3,50845. \\ s_2 &= 3224,4 \end{aligned}$$

Вычисленіе $\frac{n_2}{s_2}$.

Вычисленіе $\frac{n_2' - n_2}{r_2}$.

$$\left. \begin{aligned} \lg n_2 &= 0,18107 \\ -\lg s_2 &= 4,49155 \end{aligned} \right\} +$$

$$\lg \frac{n_2}{s_2} = 4,67262$$

$$\left. \begin{aligned} \lg [-(n_2' - n_2)] &= 1,71374 \\ -\lg (-r_2) &= 3,35853 \end{aligned} \right\} +$$

$$\lg \frac{n_2' - n_2}{r_2} = 3,07227$$

$$\frac{n_2}{s_2} = 0,00047057$$

$$\frac{n_2' - n_2}{r_2} = 0,00118105.$$

Поэтому

$$\frac{1}{s_2'} = \frac{\frac{n_2}{s_2} + \frac{n_2' - n_2}{r_2}}{n_2'} = 0,00165162,$$

следовательно

$$\lg \frac{1}{s_2'} = 3,21791 = -\lg s_2',$$

откуда находимъ, что

$$\begin{aligned} \lg s_2' &= -3,21791 = 2,78209 \\ s_2' &= 605,47. \end{aligned}$$

Значитъ, лучъ AB , пройдя черезъ обѣ преломляющія поверхности, пересѣчетъ ось C_2C_1 въ точкѣ L_2 на разстояніи $S_2L_2 = 605,47$ мм. отъ вершины S_2 второй преломляющей поверхности.

Если бы было не двѣ преломляющихъ поверхности, а больше, то мы могли-бы продолжать такія же разсужденія дальше и каждый разъ по извѣстному s_k нашли бы s'_k .

Замѣтимъ, что при подобныхъ вычисленіяхъ предполагается, что центры всѣхъ преломляющихъ поверхностей лежатъ на одной и той-же прямой, которая и принимается за ось.

Система преломляющихъ поверхностей, которыхъ центры лежатъ на одной прямой, называется *центрированной оптической системою*, и если мы будемъ говорить о системѣ преломляющихъ поверхностей, то мы будемъ имѣть въ виду именно центрированную систему.

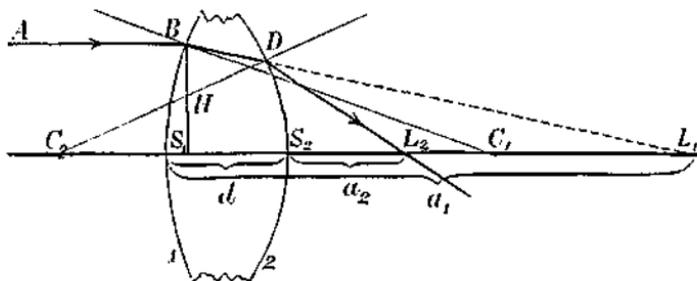
Объективы телескоповъ, микроскоповъ и фотографическіе объективы представляютъ собою центрированныя системы поверхностей.

§ 9. Тригонометрическія формулы для вычисленія пути луча при прохожденіи его чрезъ преломляющія поверхности. Въ предыдущемъ численномъ примѣрѣ мы видѣли, какъ вычисляется центральный лучъ, но иногда желательно вычислить и нецентральный лучъ. Вотъ теперь мы и приступаемъ къ изложенію формулъ для вычисленія нецентральныхъ лучей. Онѣ имѣютъ весьма важное значеніе при вычисленіи объективовъ.

Какъ и въ предыдущемъ численномъ примѣрѣ, предположимъ, что свѣтящаяся точка находится на оси C_2C_1 (фиг. 12) такъ далеко отъ S_1 влево, что лучъ AB , идущій отъ нея, можно считать параллельнымъ оси C_2C_1 .

Но мы не кладемъ условія, чтобы точка B была непременно весьма близко къ S_1 . Разсмотримъ прохожденіе луча AB черезъ двѣ преломляющія поверхности: 1 съ центромъ въ C_1 и 2 съ центромъ въ C_2 . Разстояніе между вершинами этихъ поверхностей обозначимъ чрезъ $d = S_1S_2$.

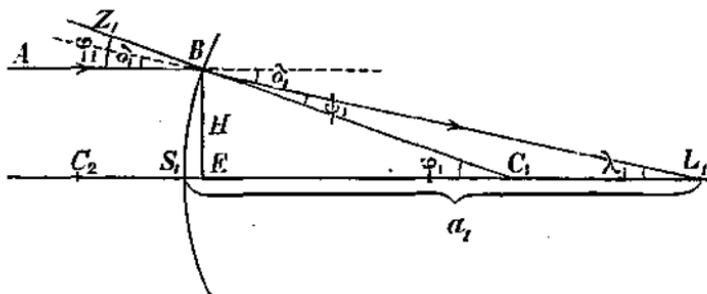
Лучъ идетъ въ первой среднѣ по AB , затѣмъ во второй—по BD , направляясь въ точку L_1 ; выйдя въ третью средню, онъ идетъ по DL_2 . Абсолютные показатели трехъ данныхъ среднъ обозначимъ поочередно черезъ n_1, n_2 и n_3 . Радиусъ первой преломляющей поверхности обозначимъ по прежнему черезъ r_1 , а радиусъ второй—черезъ r_2 . Не будемъ забывать, что согласно принятымъ условіямъ



фиг. 12.

подъ r_2 въ нашемъ случаѣ понимается отрицательное число. Данными считаются $n_1, n_2, n_3, r_1, r_2, d$ и H , гдѣ H длина перпендикуляра, опущеннаго изъ точки паденія B на прямую C_2C_1 , а искомыми считаются $S_1L_1 = a_1$ и $S_2L_2 = a_2$.

Во избѣжаніе усложненій въ чертежѣ мы для каждой разсматриваемой поверхности будемъ брать отдѣльный чертежъ. Чертежъ (фиг. 13) для первой преломляющей поверхности.



фиг. 13.

Перпендикуляромъ паденія для луча AB служитъ радиусъ C_1B , продолженный до произвольной точки Z_1 .

Изъ прямоугольнаго треугольника BC_1E имѣемъ:

$$\frac{BE}{BC_1} = \sin BC_1E,$$

но $\angle BC_1E = \angle Z_1BA = \varphi_1 =$ углу паденія; слѣдовательно

$$\sin \varphi_1 = \frac{H}{r_1} \dots \dots \dots (25)$$

На основаніи закона преломленія свѣта имѣемъ:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \psi_1$$

или

$$\sin \psi_1 = \frac{n_1}{n_2} \sin \varphi_1 \dots \dots \dots (26)$$

гдѣ ψ_1 уголъ преломленія.

Далѣе, изъ $\triangle BL_1C_1$ находимъ:

$$\frac{C_1L_1}{BC_1} = \frac{\sin \psi_1}{\sin \lambda_1}.$$

Но $\angle \lambda_1 = \angle \delta_1$, гдѣ δ_1 обозначаетъ уголъ отклоненія луча при входѣ во вторую средину отъ первоначальнаго направленія; кромѣ того замѣчаемъ, что

$$C_1L_1 = a_1 - r_1 \text{ и } BC_1 = r_1;$$

поэтому последнюю пропорцію можемъ переписать въ такомъ видѣ:

$$\frac{a_1 - r_1}{r_1} = \frac{\sin \psi_1}{\sin \lambda_1}$$

или

$$a_1 - r_1 = r_1 \frac{\sin \psi_1}{\sin \lambda_1} \dots \dots \dots (27)$$

Еще замѣтимъ, что

$$\delta_1 = \varphi_1 - \psi_1 = \lambda_1 \dots \dots \dots (28)$$

Лучъ AB опредѣляется величиною H . По данному H мы на основаніи ур. (25) находимъ φ_1 , затѣмъ изъ ур. (26) найдемъ ψ_1 , потомъ изъ ур. (28) найдемъ λ_1 , а по ур. (27) опредѣлимъ $a_1 - r_1$. Зная $a_1 - r_1$, легко найдемъ и само a_1 , т. е. S_1L_1 .

На чертежѣ (фиг. 13) мы рассмотрѣли путь луча въ предположеніи, что нѣтъ другой поверхности. Допуская же теперь, что за первою поверхностью на нѣкоторомъ разстояніи расположена еще и другая, мы разсуждаемъ такъ. Лучъ, преломившись первою поверхностью, направляясь въ точку L_1 по прямой BL_1 (фиг. 13 и фиг. 12), по встрѣтивъ на пути въ точкѣ D (фиг. 12) вторую поверхность, онъ вторично преломился и направился по нѣкоторой прямой DL_2 . Чертежъ (фиг. 14) представляетъ отдѣльно дальнѣйшій путь луча, начиная отъ точки D второй поверхности.

Проведя перпендикуляръ паденія C_2Z_2 , назовемъ уголъ паденія и уголъ преломленія соответственно буквами φ_2 и ψ_2 .

Изъ $\triangle DC_2L_1$ слѣдуетъ, что

$$\frac{C_2L_1}{C_2D} = \frac{\sin C_2DL_1}{\sin \lambda_1}$$

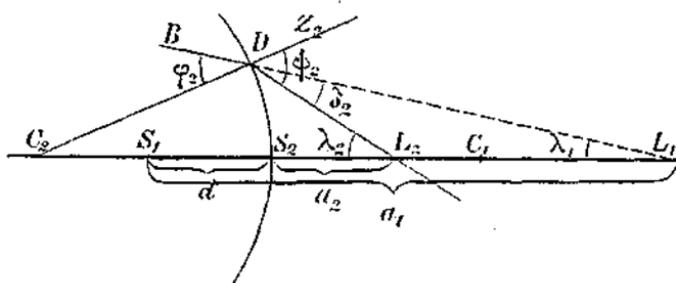
Но $\sin C_2DL_1 = \sin C_2DB = \sin \varphi_2$, $C_2D = -r_2$

II

$$C_2L_1 = S_1L_1 + (C_2S_2 - S_2S_1) = S_1L_1 + C_2S_2 - S_2S_1$$

III

$$C_2L_1 = a_1 - r_2 - d;$$



фиг. 14.

поэтому последняя пропорція переищется такъ:

$$\frac{a_1 - r_2 - d}{-r_2} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \lambda_1},$$

откуда

$$\sin \varphi_2 = \frac{a_1 - r_2 - d}{-r_2} \sin \lambda_1 \dots \dots \dots (29)$$

На основаніи закона преломленія свѣта имѣемъ

$$n_2 \sin \varphi_2 = n_3 \sin \psi_2$$

или

$$\sin \psi_2 = \frac{n_2}{n_3} \sin \varphi_2 \dots \dots \dots (30)$$

Дальше, замѣчаемъ, что

$$\delta_2 = \psi_2 - \varphi_2 \dots \dots \dots (31)$$

и

$$\lambda_2 = \delta_2 + \lambda_1 \dots \dots \dots (32)$$

Изъ $\triangle DC_2L_2$ находимъ, что

$$\frac{C_2L_2}{C_2D} = \frac{\sin C_2DL_2}{\sin \lambda_2}$$

но $\sin C_2DL_2 = \sin L_2DZ_2 = \sin \psi_2$, $C_2L_2 = C_2S_2 + S_2L_2 = -r_2 + a_2$

и

$$C_2D = -r_2;$$

поэтому последнюю пропорцію переищемъ такъ:

$$\frac{-r_2 + a_2}{-r_2} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \lambda_2},$$

откуда находимъ:

$$-r_2 + a_2 = -r_2 \frac{\sin \phi_2}{\sin \lambda_2} \dots \dots \dots (33)$$

По формулѣ (29) найдемъ φ_2 ; зная φ_2 , по формулѣ (30) найдемъ ϕ_2 ; зная ϕ_2 , по форм. (31) найдемъ δ_2 , а затѣмъ и λ_2 по форм. (32), потомъ по форм. (33) опредѣлимъ $-r_2 + a_2$; зная $-r_2 + a_2$, легко уже опредѣлимъ и a_2 , т. е. опредѣлимъ, на какомъ разстояніи отъ вершины S_2 задней поверхности находится точка пересѣченія вышедшаго луча съ осью C_2C_1 .

Если бы была еще третья преломляющая поверхность, то мы бы могли продолжить разсужденія дальше путемъ, аналогичнымъ изложенному, нужно только условіе, чтобы центры всѣхъ преломляющихъ поверхностей лежали на одной прямой.

Изложенныя формулы не носятъ на себѣ характера общихъ формулъ; ихъ дѣлаютъ болѣе общими, ставя двойной знакъ передъ радіусами *). Мы этого не дѣлали, предполагая, что въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ легко сообразить, какъ нужно измѣнить ту или другую формулу.

Продѣлаетъ теперь численный примѣръ и сохранимъ въ немъ тѣ же условія, какія были приняты въ предыдущемъ численномъ примѣрѣ, т. е. будемъ полагать что первая и третья срединны—воздухъ, а вторая—стекло, котораго показатель преломленія относительно воздуха 1,5173; кромѣ того

$$\begin{aligned} r_1 &= 1101 \text{ mm.} \\ r_2 &= -438 \text{ mm.} \\ S_1S_2 &= d = 5 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Разница будетъ только въ томъ, что теперь разсматриваемый лучъ будетъ нецентральный и будетъ пересѣкать первую поверхность, напр. на высотѣ $H = 50 \text{ mm.}$ отъ ося (фиг. 12).

Прежде, чѣмъ приступать къ вычисленіямъ, замѣтимъ, что $\frac{n_2}{n_1}$ представляетъ собою показателя преломленія второй срединны по отношенію къ первой, т. е. стекла по отношенію къ воздуху (§ 1, ур. (3)); слѣдовательно $\frac{n_2}{n_1} = 1,5173 = \frac{n_2}{n_3}$, откуда $\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{1,5173}$.

Логарифмы многихъ чиселъ, которые войдутъ теперь въ вычисления, уже встрѣчались въ первомъ численномъ примѣрѣ.

*) См. соч. „Handbuch der praktischen Optik“ A. Steinheil. und E. Voit.

Для первой поверхности.

Вычисление φ_1 по форм. (25).

$$\begin{aligned} \lg H &= 1,69897 \\ -\lg r_1 &= 4,95821 \quad + \\ \lg \sin \varphi_1 &= 2,65718 \\ \varphi_1 &= 2^{\circ}36'10'' \end{aligned}$$

Вычисление ψ_1 по форм. (26).

$$\begin{aligned} \lg \frac{n_1}{n_2} &= 1,81893 \\ \lg \sin \varphi_1 &= 2,65718 \quad + \\ \lg \sin \psi_1 &= 2,47611 \\ \psi_1 &= 1^{\circ}42'54'' \end{aligned}$$

Вычисление λ_1 по форм. (28).

$$\varphi_1 - \psi_1 = 0^{\circ}53'16'' = \lambda_1$$

Вычисление a_1 по форм. (27).

$$\begin{aligned} \lg r_1 &= 3,04179 \\ \lg \sin \psi_1 &= 2,47611 \quad + \\ -\lg \sin \lambda_1 &= 1,80985 \\ \lg(a_1 - r_1) &= 3,32775 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_1 - r_1 &= 2126,9 \text{ mm.} \\ r_1 &= 1101 \text{ mm.} \quad + \\ a_1 &= 3227,9 \text{ mm.} = S_1 L_1 \end{aligned}$$

Для второй поверхности.

Вычисление $a_1 - r_2 - d$.

$$\begin{aligned} + a_1 - d &= 3222,9 \text{ mm.} = S_2 L_1 \\ - r_2 &= 438 \text{ mm.} \\ a_1 - r_2 - d &= 3660,9 \text{ mm.} = C_2 L_1 \end{aligned}$$

Вычисление φ_2 по форм. (29).

$$\begin{aligned} \lg(a_1 - r_2 - d) &= 3,56359 \\ \lg \sin \lambda_1 &= 2,19015 \quad + \\ -\lg(-r_2) &= 3,35853 \\ \lg \sin \varphi_2 &= 1,11227 \\ \varphi_2 &= 7^{\circ}26'26'' \end{aligned}$$

Вычисление ψ_2 по форм. (30).

$$\begin{aligned} \lg \frac{n_2}{n_3} &= 0,18107 \quad + \\ \lg \sin \varphi_2 &= 1,11227 \\ \lg \sin \psi_2 &= 1,29334 \\ \psi_2 &= 11^{\circ}19'54'' \end{aligned}$$

Вычисление δ_2 и λ_2

по формуламъ (31 и (32).

$$\begin{aligned} \psi_2 &= 11^{\circ}19'54'' \\ \varphi_2 &= 7^{\circ}26'26'' \\ \delta_2 &= 3^{\circ}53'28'' = \psi_2 - \varphi_2 \\ \lambda_1 &= 0^{\circ}53'16'' \quad + \\ \lambda_2 &= 4^{\circ}46'44'' \end{aligned}$$

Вычисление $a_2 - r_2$ и a_2
по форм. (33).

$$\begin{aligned} \lg(-r_2) &= 2,64147 \\ \lg \sin \psi_2 &= 1,29334 \quad + \\ -\lg \sin \lambda_2 &= 1,07930 \\ \lg(a_2 - r_2) &= 3,01411 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_2 - r_2 &= 1038 \text{ mm.} \\ r_2 &= -438 \text{ mm.} \\ a_2 &= 595 \text{ mm.} = S_2 L_2 \end{aligned}$$

Любопытно намъ сравнить результаты, полученные для центрального луча съ результатами для луча, падающаго на высоту $H = 50$ мм.

Для центрального луча

(фиг. 11):

$$S_1L_1 = s_1' = 3229,4 \text{ мм.}$$

$$S_2L_2 = s_2' = 605,47 \text{ мм.}$$

Для луча на высоту 50 мм.

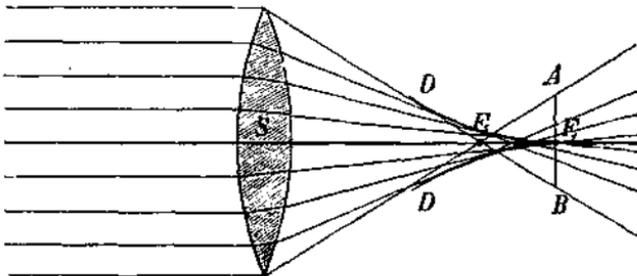
(фиг. 12):

$$S_1L_1 = a_1 = 3227,9 \text{ мм.}$$

$$S_2L_2 = a_2 = 595 \text{ мм.}$$

Сопоставленіе этихъ результатовъ ясно намъ показываеъ, что нецентральный лучъ отклоняется при преломленіи замѣтно сильнѣе центрального. Эти результаты вычисления вполне согласуются съ опытомъ.

Въ сущности въ нашихъ численныхъ примѣрахъ преломляющія поверхности ограничивали двояковыпуклое стекло, и мы приходимъ къ заключенію, что если на двояковыпуклое стекло падаетъ пучекъ лучей, параллельныхъ линіи, соединяющей центры обѣихъ поверхностей, то по выходѣ изъ стекла лучи не собираются въ одной точкѣ и если прослѣдить всѣ лучи, начиная съ центральныхъ и кончая крайними, то мы замѣтимъ, что центральные лучи собираются



фиг. 15.

въ нѣкоторой точкѣ F_1 (фиг. 15), а крайніе—въ точкѣ F_2 , ближе къ стеклу. Промежуточные же лучи соберутся въ промежуткѣ между F_1 и F_2 и тѣмъ ближе къ F_2 , чѣмъ ближе лучи къ крайнимъ. Такимъ образомъ всѣ падающія на стекло лучи по выходѣ изъ него не собираются въ одной точкѣ и образуютъ собою родъ чаши, боковая поверхность которой называется *каустическою*. Вообразимъ себѣ, что этотъ чашеобразный пучекъ пересѣченъ плоскостью, проходящею черезъ F_1 и перпендикулярною къ оси, тогда въ сѣченіи получится кругъ съ діаметромъ AB . Этотъ кругъ содержитъ въ себѣ всѣ лучи, прошедшіе черезъ стекло. Приближая сѣкущую плоскость къ F_2 , мы можемъ найти мѣсто, гдѣ въ сѣченіи получается самый малый кружочекъ.

Если бы падающіе на стекло лучи были не параллельны и выходили изъ нѣкоторой свѣтящейся точки, расположенной на линіи, проходящей черезъ центры обѣихъ преломляющихъ поверхностей, то по выходѣ изъ стекла такіе лучи также точно не собирались бы въ

одной точкѣ, а образовали бы родъ чаши. Мы бы могли выбрать самое узкое мѣсто этой чаши и пересѣчь ее въ этомъ мѣстѣ плоскостью, перпендикулярною къ оси. Въ сѣченіи мы бы получили на крапѣ свѣтлое пятнышко, которое естественнѣе всего кришлось бы считать изображеніемъ той свѣтящейся точки, отъ которой нами, на стекло лучи и послѣ преломленія въ немъ образовали упомянутый чашеобразный лучекъ *).

Такъ какъ лучи, вышедшіе изъ свѣтящейся точки, послѣ преломленія не собираются все въ одной точкѣ, то происходитъ нестѣслливость изображенія, которая называется *сферической аберраціей*.

Замѣтимъ, что разстояніе F_1F_2 (фиг. 15) называется *продольной аберраціей* а разстояніе F_1A или F_1B —*поперечною*.

Намъ еще придется говорить объ аберраціи послѣ.

Оптическія центрированныя системы.

§ 10. **Прохождение свѣта черезъ центрированную оптическую систему.** Мы уже упоминали (§ 8), что центрированную оптическую системую называется совокупность такихъ преломляющихъ поверхностей, которыхъ центры лежатъ на одной прямой. Эта прямая называется *оптической осью* или просто *осью* системы.

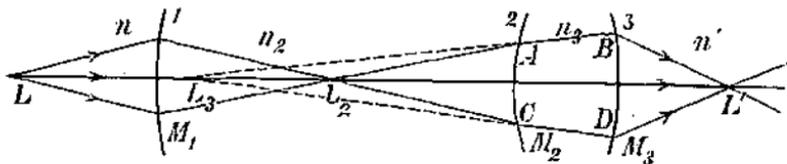
Въ послѣднихъ двухъ параграфахъ мы на численныхъ примѣрахъ показали, какъ вычисляются центральные и нецентральные лучи, падающіе на центрированную систему въ плоскости, проходящей черезъ оптическую ось. Особенность луча, падающаго на центрированную систему въ осевой плоскости, та, что онъ, проходя черезъ систему, при всѣхъ своихъ послѣдовательныхъ преломленіяхъ остается въ одной и той же плоскости, определяемой оптической осью и первоначальною точкою паденія. Это слѣдуетъ непосредственно изъ закона преломленія свѣта (см. § 1, пунктъ 1).

Мы теперь намѣрены подробно рассмотреть свойства центрированной системы.

Положимъ, что центрированная система состоитъ изъ m преломляющихъ поверхностей. Мы по прежнему будемъ представлять себѣ, что свѣтъ идетъ слѣва направо и падаетъ на первую преломляющую поверхность системы. Влѣво отъ первой преломляющей поверхности располагается первая средина, между первой и второю преломляющими поверхностями располагается вторая средина и т. д., наконецъ, вправо отъ послѣдней преломляющей поверхности простира-

*) Хотя, что въ данномъ случаѣ принять за изображеніе, это еще зависитъ отъ концентрации свѣта. Иногда естественнѣе принять за изображеніе точки болѣе обширный кругъ, если только свѣтъ сосредоточенъ главнымъ образомъ въ центрѣ его, а онъ самъ вообще мало яркій.

ется послѣдняя середина. Понятно, что если преломляющихъ поверхностей n , то срединъ $n+1$. Показатели первой средины мы будемъ



фиг. 16.

обозначать буквою n , а послѣдней средины буквою n' . Далѣе, показатели преломленія второй, третьей и т. д. срединъ будемъ обозначать соответственно буквами: n_2, n_3, \dots

Мы будемъ разсматривать только центральные лучи; слѣдовательно подъ углами наклоненія и будутъ пониматься весьма малые углы.

Пусть изъ свѣтящейся точки L (фиг. 16), лежащей въ первой срединѣ на оптической оси LL' , падаютъ центральные лучи на первую поверхность M_1 . Эта преломляющая поверхность, какъ знаемъ, дастъ намъ изображеніе на оси LL' въ нѣкоторой точкѣ L_2 . Въ нашемъ случаѣ (фиг. 16) это изображеніе дѣйствительное. Оно очевидно служить предметомъ по отношенію къ другой преломляющей поверхности M_2 . Вторая преломляющая поверхность M_2 въ свою очередь доставляетъ новую точку L_3 , которая служитъ изображеніемъ точки L_2 .

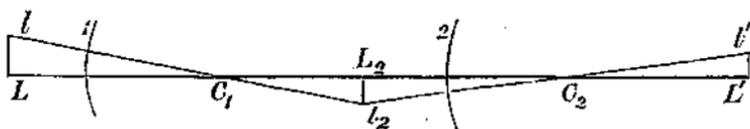
Въ нашемъ случаѣ изображеніе L_3 мнимое. Такимъ образомъ каждой преломляющей поверхности производитъ новое изображеніе, которое служитъ предметомъ для послѣдующей преломляющей поверхности. Наконецъ, послѣдняя поверхность, въ нашемъ случаѣ M_3 , даетъ изображеніе L' . Это послѣднее изображеніе и будетъ изображеніемъ точки L , производимымъ разсматриваемою системою.

Значитъ, мы видимъ, что лучи, вышедшіе изъ точки L и вошедшіе въ систему, по выходѣ изъ нея опять сходятся въ нѣкоторой точкѣ L' . Нетрудно видѣть, что лучи, вышедшіе изъ L' и упавшіе на систему, иди обратно: справа налѣво, по выходѣ изъ нея пересѣклись бы въ точкѣ L (§ 1, пунктъ 3). Точки L и L' называются сопряженными по отношенію къ системѣ.

Обратимъ здѣсь вниманіе на то, что каждой срединѣ отвѣчаетъ точка схожденія лучей и именно тѣхъ, которые на самомъ дѣлѣ пробѣгаютъ въ этой срединѣ. Первой срединѣ отвѣчаетъ точка L , второй—точка L_2 , третьей— L_3 и четвертой (послѣдней)—точка L' . Точка схожденія лучей (или ихъ продолженій) можетъ находиться совсѣмъ не въ той срединѣ, къ которой она относится, лишь бы только образующіе ее лучи дѣйствительно шли въ этой срединѣ; наприм.

точка L_2 (фиг. 16) находится во второй срединѣ, но она принадлежитъ третьей срединѣ, ибо образуется продолженіями лучей AB и CD , которые дѣйствительно идутъ въ третьей срединѣ. Средину, къ которой относится предметъ, часто называютъ *пространствомъ предмета*, а средину, къ которой относится изображеніе, называютъ *пространствомъ изображенія*.

Возьмемъ теперь свѣтящуюся точку l (фиг. 17) внѣ оптической осн. Вспомнивъ изложенное въ § 3-мъ, мы скажемъ, что лучи, падающіе изъ l въ видѣ узкаго пучка на первую преломляющую поверхность 1, собираются послѣ преломленія въ нѣкоторой точкѣ l_2 . Сопряженныя точки l и l_2 лежатъ на прямой, проходящей черезъ центръ C_1



фиг. 17.

первой поверхности (§ 2). Затѣмъ, лучи, выходящіе изъ l_2 и падающіе на вторую преломляющую поверхность 2, послѣ преломленія ею опять собираются въ нѣкоторой точкѣ l' . Сопряженныя точки l_2 и l' лежатъ на прямой, проходящей черезъ центръ C_2 второй поверхности. Если бы было больше преломляющихъ поверхностей, мы бы продолжали такіа же разсужденія дальше.

Такимъ образомъ мы видимъ, что *если лучи до входа въ систему имѣли точку схождения, то и послѣ выхода изъ системы они будутъ имѣть такую же точку схождения.*

Опустимъ изъ l на оптическую ось C_1C_2 перпендикуляръ lL . Предполагая, что lL представляетъ свѣтящуюся прямую незначительной величины, мы скажемъ, что первая преломляющая поверхность доставитъ изображеніе этой прямой въ видѣ прямой l_2L_2 , перпендикулярной къ оси C_1C_2 (§ 4). Вторая поверхность 2, для которой l_2L_2 служитъ предметомъ, въ свою очередь произведетъ новое изображеніе $l'L'$ тоже въ видѣ линіи, перпендикулярной къ оси C_1C_2 . Очевидно, что всѣ эти перпендикуляры lL , l_2L_2 и $l'L'$ находятся въ одной плоскости, проходящей черезъ ось C_1C_2 . (§ 10).

Слѣдовательно *отъ свѣтящейся прямой, перпендикулярной къ оптической оси, получается при посредствѣ системы изображеніе тоже въ видѣ прямой, перпендикулярной къ той же оптической оси.*

Также точно можно убѣдиться, что *плоскость, перпендикулярная къ оптической оси, изображается посредствомъ системы въ видѣ плоскости, перпендикулярной къ оси, лишь бы было соблюдено условіе, что углы наклоненія лучей незначительны.*

Вообще видимъ, что центрированная оптическая система дѣйствуетъ на падающіе на нее лучи подобно тому, какъ дѣйствуетъ одна только преломляющая поверхность. Такъ что и по отношенію къ оптической системѣ существуютъ сопряженные точки, сопряженные линіи и сопряженные плоскости. Надо помнить, что сопряженные линіи или сопряж. плоскости состоятъ изъ соответственно сопряженныхъ точекъ.

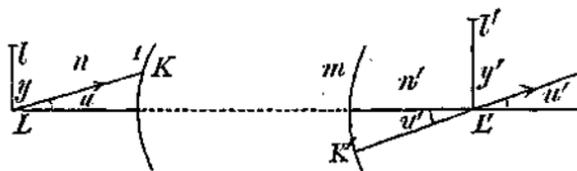
§ 11. Свойства двухъ сопряженныхъ плоскостей оптической системы. Уравненія (7) и (8), выведенныя въ предыдущихъ параграфахъ для одной преломляющей поверхности, показываютъ что для двухъ сопряженныхъ плоскостей поперечное и угловое увеличенія постоянны. Примѣняя это правило послѣдовательно къ каждой преломляющей поверхности оптической системы, мы приходимъ къ заключенію, что для двухъ сопряженныхъ плоскостей системы поперечное и угловое увеличенія постоянны.

§ 12. Обобщеніе формулы Лягранжа, формула Гельмгольца. Мы вывели (§ 4) въ случаѣ одной преломляющей поверхности формулу

$$y' \cdot n' \cdot \operatorname{tg} u' = y \cdot n \cdot \operatorname{tg} u \dots \dots \dots (10)$$

носящую названіе формулы Лягранжа, такъ какъ Лягранжъ впервые ее вывелъ для одной преломляющей поверхности.

Покажемъ, что такая же формула имѣетъ мѣсто и для оптической системы.



фиг. 18.

На чертежѣ (фиг. 18) изображены только первая и послѣдняя поверхности оптической системы; кромѣ того LL' —это свѣтящійся предметъ, $L'L'$ —его изображеніе, производимое системой, LK —лучъ, падающій въ первой срединѣ изъ L на первую преломляющую поверхность, $L'K'$ —лучъ по выходѣ изъ системы. Остальные промежуточные элементы системы не изображены на чертежѣ и замѣнены пунктирною линіею.

Лучъ, входя въ новую средину, тотчасъ мѣняетъ свое направленіе; поэтому каждой срединѣ отвѣчаетъ особый уголъ наклоненія луча u_k , при чемъ мы имѣемъ въ виду лучъ, несовпадающій съ осью.

Обозначимъ буквами $u, u_2, u_3 \dots u'$ углы наклоненія, которые послѣдовательно образуетъ лучъ въ срединахъ съ оптической осью при своемъ прохожденіи черезъ систему.

Далѣе, обозначимъ черезъ $y, y_2, y_3 \dots y'$ величины предмета и послѣдовательныхъ его изображеній, при чемъ предполагается, что этотъ предметъ и его изображенія находятся соответственно въ вершинахъ угловъ $u, u_2, u_3 \dots u'$, т. е. въ тѣхъ точкахъ, въ которыхъ разсматриваемый лучъ пересекаетъ оптическую ось.

Примѣняя послѣдовательно къ каждой преломляющей поверхности формулу Лигранжа (10), получимъ рядъ слѣдующихъ равенствъ:

$$y \cdot n \cdot \operatorname{tg} u = y_2 \cdot n_2 \cdot \operatorname{tg} u_2 \quad \text{для 1-ой поверхности}$$

$$y_2 \cdot n_2 \cdot \operatorname{tg} u_2 = y_3 \cdot n_3 \cdot \operatorname{tg} u_3 \quad \text{для 2-ой "}$$

$$y_3 \cdot n_3 \cdot \operatorname{tg} u_3 = y_4 \cdot n_4 \cdot \operatorname{tg} u_4 \quad \text{для 3-ей "}$$

$$y_m \cdot n_m \cdot \operatorname{tg} u_m = y' \cdot n' \cdot \operatorname{tg} u' \quad \text{для } m\text{-ой "}$$

Такъ какъ каждое изъ этихъ равенствъ кончается такимъ же выраженіемъ, какимъ начинается слѣдующее, то получимъ такую формулу:

$$y \cdot n \cdot \operatorname{tg} u = y' \cdot n' \cdot \operatorname{tg} u' \dots \dots \dots (34)$$

Она носитъ названіе формулы Гельмгольца, который впервые ее вывелъ для системы *).

Изъ сказаннаго заключаемъ, что *произведеніе величины изображенія, показателя преломленія и тангенса угла наклоненія луча есть величина постоянная для каждой среды системы.*

Формулу (34) можно представить такъ:

$$\frac{y'}{y} \cdot \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{n}{n'} \dots \dots \dots (35)$$

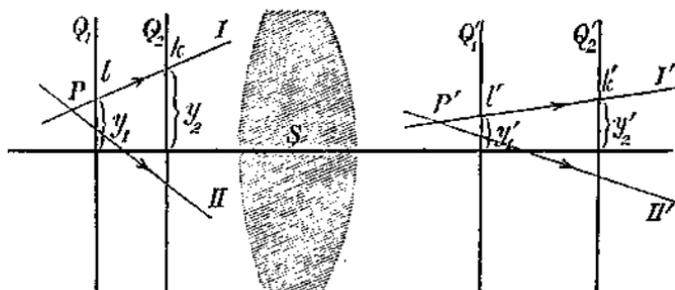
гдѣ $\frac{y'}{y}$ означаетъ поперечное увеличеніе, а $\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u}$ угловое увеличеніе по отношенію къ системѣ. Значитъ и для системы *произведеніе углового увеличенія на поперечное есть величина постоянная* такъ же точно, какъ и для одной преломляющей поверхности § 4.

§ 13. Нахожденіе изображенія произвольной точки. Пусть на чертѣжѣ (фиг. 19) S изображаетъ систему съ нѣкоторымъ числомъ m преломляющихъ поверхностей.

Покажемъ, что если намъ даны двѣ пары сопряженныхъ плоскостей: одна пара Q_1 и Q_1' и другая Q_2 и Q_2' и если известны поперечныя увеличенія $\frac{y_1'}{y_1} = v_1$ въ парѣ Q_1 и Q_1' и $\frac{y_2'}{y_2} = v_2$ въ парѣ Q_2 и Q_2' ; то этимъ дѣйствіе системы вполне опредѣлено и для каждой данной точки P можемъ легко опредѣлить сопряженную съ нею точку P' . Въ самомъ дѣлѣ, представимъ себѣ лучъ I , проходящій черезъ P и входящій въ систему S . Этотъ лучъ пересекаетъ плоскости Q_1 и Q_2 въ нѣкоторыхъ точкахъ l и k на расстояніяхъ y_1 и y_2 отъ осл.

*) Для краткости рѣчи мы будемъ говорить „система“ вмѣсто „центрированная оптическая система“.

Лучу I отвечает сопряженный луч I' , выходящий из системы в последней средине. Луч I' пересекает плоскости Q_1' и Q_2' в некоторых точках l' и k' на расстояниях y_1' и y_2' от осп. Понятно, что точки l' и k' соответственно сопряжены с l и k . Это



фиг. 19.

следует из понятия о сопряженных точках и сопряженных плоскостях.

Из равенств

$$\frac{y_1'}{y_1} = v_1 \text{ и } \frac{y_2'}{y_2} = v_2$$

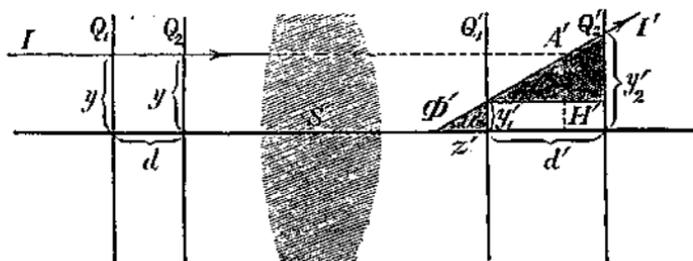
находим:

$$y_1' = v_1 y_1 \text{ и } y_2' = v_2 y_2.$$

Последние два равенства определяют нам положение луча I' по заданным y_1 и y_2 , определяющим положение луча I .

Таким же точно образом определим положение луча II' , сопряженного с другим лучем II , проходящим через P и входящим в систему. Изображение точки P должно находиться и на луче I' и на луче II' ; следовательно P' , т. е. точка пересечения лучей I' и II' , представляет искомое изображение, или точку, сопряженную с P .

§ 14. **Фокусы, фокусные расстояния и фокусные плоскости; главные точки и главные плоскости.** Теперь возьмем за луч I луч, идущий в первой средине параллельно осп (фиг. 20).



фиг. 20.

Онъ пересекает обе плоскости Q_1 и Q_2 на одной и той же высоте y над осью. Чтобы определить, на каких высотах пересе-

касть сопряженный съ нимъ лучъ I' плоскости Q_1' и Q_2' , мы пользуемся уравненіями:

$$y_1' = v_1 y$$

и

$$y_2' = v_2 y .$$

Обозначимъ точку пересѣченія сопряженного луча I' съ осью черезъ Φ' , разстояніе этой точки отъ плоскости Q_1' — черезъ z' и разстояніе между плоскостями Q_1' и Q_2' — черезъ d' ; тогда изъ подобія заштрихованныхъ прямоугольныхъ треугольниковъ получимъ слѣдующее уравненіе:

$$\frac{z'}{d'} = \frac{y_1'}{y_2' - y_1'} ,$$

которое на основаніи предыдущихъ двухъ равенствъ преобразуется въ такое:

$$\frac{z'}{d'} = \frac{v_1 y}{v_2 y - v_1 y} = \frac{v_1}{v_2 - v_1} ,$$

откуда имѣемъ:

$$z' = \frac{v_1}{v_2 - v_1} \cdot d' \dots \dots \dots (a)$$

Это равенство показываетъ, что положеніе точки Φ' не зависитъ отъ высоты y параллельнаго оси луча; поэтому всѣ лучи, идущіе въ первой срединѣ параллельно оси, по выходѣ изъ системы пересѣкаютъ ось въ одной и той же точкѣ. Эта точка называется *фокусомъ* системы.

Обозначимъ уголъ наклоненія выходящаго въ послѣдней срединѣ луча I' черезъ u' ; тогда изъ чертежа (фиг. 20).

видно, что

$$y_1' = z' \operatorname{tg} u' ;$$

а такъ какъ

$$y_1' = v_1 y ,$$

то

$$v_1 y = z' \operatorname{tg} u' ,$$

откуда имѣемъ:

$$\frac{y}{\operatorname{tg} u'} = \frac{z'}{v_1} .$$

Подставляя въ послѣднее равенство вмѣсто z' его значеніе изъ ур. (a), получимъ:

$$\frac{y}{\operatorname{tg} u'} = \frac{v_1 d'}{v_2 - v_1} : v_1 = \frac{d'}{v_2 - v_1} .$$

Послѣднее равенство показываетъ, что *отношеніе высоты входящаго луча, параллельнаго оси, къ тангенсу угла наклоненія со-*

Примѣчаніе. Не надо упускать изъ виду, что въ составъ системы S (фиг. 20) могутъ входить какъ собирательныя такъ и разсѣивательныя линзы, причемъ дѣйствіе послѣднихъ можетъ преобладать.

пряженного с ним выходящего луча есть величина постоянная, независимая от высоты параллельного оси луча.

Покажемъ геометрическое значеніе этого отношенія $\frac{y}{\text{tg } u'}$.

Продолжимъ параллельный оси лучъ I до пересѣченія съ выходящимъ лучемъ I' въ нѣкоторой точкѣ A' и опустимъ изъ A' на ось перпендикуляръ, который пересѣчетъ ось въ нѣкоторой точкѣ H' . Изъ \triangle -ка $\Phi' A' H'$ слѣдуетъ:

$$A'H' = H'\Phi' \cdot \text{tg } u',$$

откуда

$$H'\Phi' = \frac{A'H'}{\text{tg } u'}$$

или

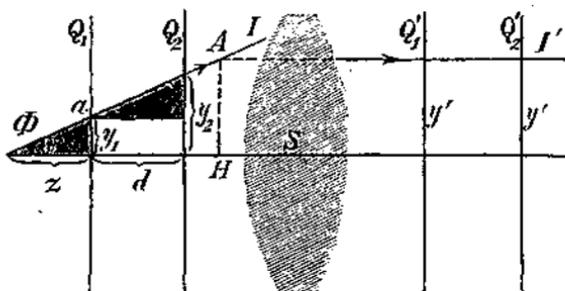
$$H'\Phi' = \frac{y}{\text{tg } u'}.$$

Слѣдовательно $\frac{y}{\text{tg } u'}$ выражаетъ разстояніе точки H' отъ фокуса Φ' . Точка H' называется *главною* точкою, а разстояніе $H'\Phi'$ называется *фокуснымъ разстояніемъ* и обозначается черезъ F' .

Поэтому

$$F' = \frac{y}{\text{tg } u'} = \frac{d'}{r_2 - r_1} \dots \dots \dots (b)$$

Раньше мы разсматривали случай, когда входящій лучъ, идущій въ первой срединѣ, былъ параллеленъ оси, а теперь разсмотримъ случай, когда выходящій лучъ I' (фиг. 21), идущій въ послѣдней срединѣ, параллеленъ оси.



фиг. 21.

Пусть параллельный оси лучъ I' пересѣкаетъ плоскости Q_1' и Q_2' на высотѣ y' . Этому лучу въ первой срединѣ отвѣчаетъ сопряженный съ нимъ входящій лучъ I , который пересѣкаетъ ось въ нѣкоторой точкѣ Φ , а плоскости Q_1 и Q_2 на высотѣ y_1 и y_2 (считая отъ оси).

Для опредѣленія y_1 и y_2 по заданному y' имѣемъ уравненія

$$\frac{y'}{y_1} = v_1 \text{ и } \frac{y'}{y_2} = v_2$$

или

$$y_1 = \frac{y'}{v_1}$$

и

$$y_2 = \frac{y'}{v_2}.$$

Обозначимъ разстояніе точки Φ отъ плоскости Q_1 черезъ z , а разстояніе между Q_1 и Q_2 —черезъ d ; тогда изъ подобія заштрихованныхъ прямоугольныхъ треугольниковъ слѣдуетъ:

$$\frac{z}{d} = \frac{y_1}{y_2 - y_1}.$$

Вставляя вмѣсто y_1 и y_2 ихъ значенія изъ предыдущихъ двухъ уравненій, найдемъ послѣ простыхъ преобразованій:

$$\frac{z}{d} = \frac{y'}{v_1} \cdot \frac{y'(v_1 - v_2)}{v_1 v_2} = \frac{v_2}{v_1 - v_2},$$

откуда:

$$z = \frac{v_2 d}{v_1 - v_2} \dots \dots \dots (c)$$

Слѣдовательно и теперь положеніе точки Φ не зависитъ отъ высоты параллельнаго оси луча; поэтому всѣ лучи, унашіе изъ точки Φ на систему, по выходѣ изъ нея будутъ параллельны оси.

Точка Φ , по прежнему, называется фокусомъ системы.

Называя буквою u уголъ наклопенія входящаго луча I , находимъ изъ чертежа (фиг. 21)

$$y_1 = z \operatorname{tg} u,$$

но

$$y_1 = \frac{y'}{v_1};$$

слѣдовательно

$$\frac{y'}{v_1} = z \operatorname{tg} u,$$

откуда

$$\frac{y'}{\operatorname{tg} u} = z \cdot v_1.$$

Подставляя вмѣсто z выше найденное для него значеніе (c), получимъ:

$$\frac{y'}{\operatorname{tg} u} = \frac{v_2 v_1 d}{v_1 - v_2}.$$

Значитъ, и здѣсь отношеніе $\frac{y'}{\operatorname{tg} u}$ не зависитъ отъ высоты луча, выходящаго параллельно оси.

Найдемъ геометрическое значеніе отношенія $\frac{y'}{\operatorname{tg} u}$.

Поступаемъ, какъ и прежде, именно продолжаемъ лучъ I' до пересѣченія съ лучемъ I въ некоторой точкѣ A . Изъ A опускаемъ на ось перпендикуляръ, который пересѣчетъ ось въ некоторой точкѣ H . Изъ прямоугольнаго треугольника ΦAH имѣемъ:

$$AH = \Phi H \cdot \operatorname{tg} u,$$

откуда

$$\frac{AH}{\operatorname{tg} u} = \Phi H$$

или

$$\Phi H = \frac{y'}{\operatorname{tg} u}.$$

Подобно преждему, разстоянiе точки H отъ фокуса Φ называется фокуснымъ разстоянiемъ и обозначается буквою F , а точка H называется главной точкою; поэтому

$$F = \frac{y'}{\operatorname{tg} u}.$$

Такимъ образомъ для системы мы получили пару фокусовъ Φ и Φ' и пару главныхъ точекъ H и H' . Мы будемъ называть Φ *первымъ* фокусомъ, а Φ' — *вторымъ*, также точно точку H будемъ называть *первою* главной точкою, а H' — *второю* главной точкою.

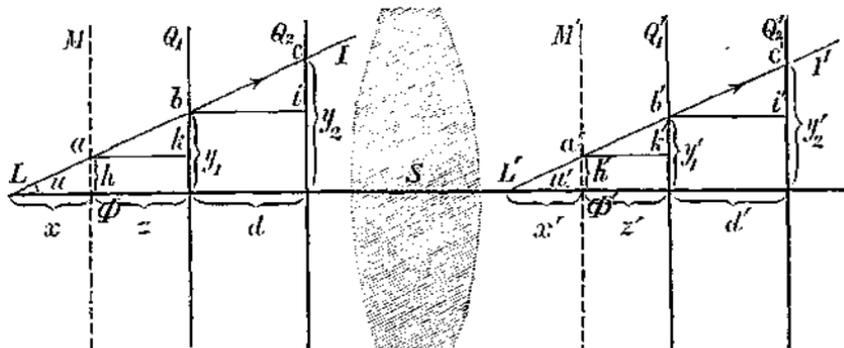
Въ этихъ точкахъ воображаютъ плоскости, перпендикулярныя оси, которыя носятъ соответственныя названiя; такъ что получаются слѣдующiя плоскости: *первая фокусная плоскость*, проходящая черезъ первый фокусъ Φ , *вторая фокусная плоскость*, проходящая черезъ второй фокусъ Φ' , *первая главная плоскость*, проходящая черезъ первую главную точку H и *вторая главная плоскость*, проходящая черезъ вторую главную точку H' .

Будемъ помнить, что *если лучи входятъ въ систему по направленiю изъ перваго фокуса, то они выходятъ изъ системы параллельно оси, если же лучи входятъ въ систему параллельно оси, то они выходятъ изъ системы по направленiю ко второму фокусу* (или изъ втораго фокуса).

Фокусное разстоянiе F будемъ называть *первымъ*, а F' — *вторымъ*.

§ 15. **Значенiе фокусныхъ плоскостей.** Пусть на систему S (фиг. 22) падаетъ въ первой срединѣ лучъ I , образующий съ осью уголъ наклоненiя u . Сопряженный же съ нимъ лучъ I' , выходящiй изъ системы въ послѣдней срединѣ, пусть образуетъ съ осью уголъ наклоненiя u' . Далѣе, пусть лучъ I пересѣкаетъ первую фокусную плоскость M и плоскости Q_1 и Q_2 соответственно въ точкахъ a , b и c , на высотахъ h , y_1 и y_2 надъ осью, а сопряженный съ нимъ лучъ I' пусть пересѣкаетъ вторую фокусную плоскость M' и плоскости Q_1' и Q_2'

соответственно въ точкахъ a' , b' и c' , на высотахъ h' , y_1' и y_2' надъ осью. Предположимъ еще, что лини ak , bi , $a'k'$ и $b'i'$ параллельны оси. Остальныхъ обозначеній, сдѣланныхъ на чертежѣ (фиг. 22), мы не поясняемъ, такъ какъ эти обозначенія имѣютъ тотъ



фиг. 22.

же смыслъ, что и на предыдущихъ чертежахъ. Изъ подобія треугольниковъ $b'c'i'$ и $a'b'k'$, а также bci и abk находимъ:

$$\frac{b'k'}{c'i'} = \frac{a'k'}{b'i'} \quad \text{и} \quad \frac{bk}{ci} = \frac{ak}{bi}$$

или

$$\frac{y_1' - h'}{y_2' - y_1'} = \frac{z'}{d'} \quad \text{и} \quad \frac{y_1 - h}{y_2 - y_1} = \frac{z}{d}$$

Последнія два равенства на основаніи формулъ для $\frac{z'}{d'}$ и $\frac{z}{d}$, выведенныхъ въ предыдущемъ параграфѣ, перенесутся такъ:

$$\frac{y_1' - h'}{y_2' - y_1'} = \frac{v_1}{v_2 - v_1} \quad \text{и} \quad \frac{y_1 - h}{y_2 - y_1} = \frac{v_2}{v_1 - v_2} \quad \dots \quad (d)$$

Въ первомъ изъ послѣднихъ двухъ равенствъ замѣнимъ y_2' и y_1' значеніями изъ уравненій

$$\left. \begin{aligned} y_2' &= y_2 \cdot v_2 \\ \text{и} \quad y_1' &= y_1 \cdot v_1 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (e)$$

тогда получимъ:

$$\frac{y_1 v_1 - h'}{y_2 v_2 - y_1 v_1} = \frac{v_1}{v_2 - v_1}$$

Рѣшаемъ это уравненіе относительно h' . Для этой цѣли сначала уничтожимъ знаменатели и получимъ:

$$(y_1 v_1 - h') (v_2 - v_1) = (y_2 v_2 - y_1 v_1) v_1$$

или

$$y_1 v_1 v_2 - h' v_2 - y_1 v_1^2 + h' v_1 = y_2 v_2 v_1 - y_1 v_1^2$$

или

$$h' (v_1 - v_2) = (y_2 - y_1) v_1 v_2$$

откуда

$$\frac{h'}{y_2 - y_1} = \frac{v_1 v_2}{v_1 - v_2}.$$

Но изъ чертежа явствуется, что

$$ci = bi \cdot \operatorname{tg} u$$

или

$$y_2 - y_1 = d \operatorname{tg} u ;$$

поэтому

$$\frac{h'}{\operatorname{tg} u} = \frac{d v_1 v_2}{v_1 - v_2}.$$

Въ предыдущемъ параграфѣ мы имѣли:

$$\frac{d v_2 v_1}{v_1 - v_2} = \frac{y'}{\operatorname{tg} u} = F$$

слѣдовательно

$$\frac{h'}{\operatorname{tg} u} = F \dots \dots \dots (36)$$

Рѣшаемъ теперь второе изъ уравненій (d) относительно h .

Уничтожая знаменателю, получимъ:

$$(y_1 - h)(v_1 - v_2) = (y_2 - y_1)v_2$$

или

$$y_1 v_1 - h v_1 - y_1 v_2 + h v_2 = y_2 v_2 - y_1 v_2$$

или

$$h(v_2 - v_1) = y_2 v_2 - y_1 v_1.$$

Замѣчаемъ теперь, что на основаніи равенствъ (e) можемъ написать $y_2 v_2 - y_1 v_1 = y_2' - y_1'$; кромѣ того изъ чертежа видно, что

$$c'i' = b'i' \cdot \operatorname{tg} u'$$

или

$$y_2' - y_1' = d' \operatorname{tg} u' ;$$

поэтому

$$h(v_2 - v_1) = d' \operatorname{tg} u' ,$$

откуда имѣемъ:

$$\frac{h}{\operatorname{tg} u'} = \frac{d'}{v_2 - v_1}.$$

Въ предыдущемъ параграфѣ мы имѣли

$$\frac{d'}{v_2 - v_1} = \frac{y'}{\operatorname{tg} u'} = F' ;$$

слѣдоват.

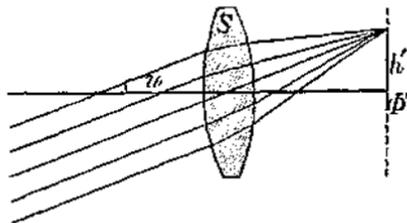
$$\frac{h}{\operatorname{tg} u'} = F' \dots \dots \dots (37)$$

Формула (37) показываетъ, что *отношеніе высоты, на которой входящій лучъ пересекаетъ первую фокусную плоскость, къ тангенсу угла наклоненія выходящаго луча, сопряженнаго съ первымъ, есть величина постоянная и равна F'* .

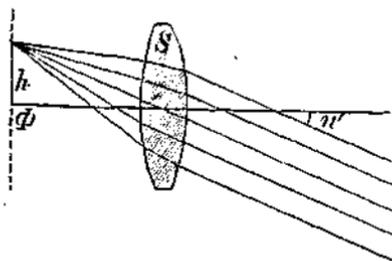
Аналогичное значение представляет и формула (36) по отношению ко второй фокусной плоскости, именно формула (36) показывает, что *отношение высоты, на которой выходящий луч пересекает вторую фокусную плоскость, къ тангенсу угла наклона входящаго луча, сопряженнаго съ первымъ, есть величина постоянная и равна F'* .

Изъ формулъ (36) и (37) вытекаетъ еще такое важное заключение:

Если на систему падаютъ параллельные лучи въ видѣ небольшого пучка, образуя съ осью одинъ и тотъ же уголъ u (фиг. 23), то по выходѣ изъ системы они пересекаютъ вторую фокусную плоскость въ одной и той же точкѣ, которая отстоитъ отъ оси на разстоянн $h' = F' \operatorname{tg} u$; а лучи, упавшіе на систему изъ точки, лежащей въ первой фокусной плоскости (фиг. 24), по вы-



фиг. 23.



фиг. 24.

ходя изъ системы, образуютъ пучекъ параллельныхъ лучей съ однимъ и тѣмъ же угломъ наклона u' , который опредѣляется уравненіемъ $\operatorname{tg} u' = \frac{h}{F'}$

Отсюда заключаемъ, что точки фокусной плоскости имѣютъ для себя сопряженныя точки въ безконечности и сами фокусныя плоскости имѣютъ свои изображенія тоже въ безконечности.

§ 16. **Гауссовское опредѣленіе фокусныхъ разстояній.** Представимъ себѣ, что система S (фиг. 25) наведена на солнце такъ, что

оптическая ось ее направляется въ самую верхнюю точку солнечнаго диска, тогда изображеніе этой точки будетъ на оптической оси въ фокусѣ Φ' . Самая нижняя точка солнца бросаетъ на систему пучекъ параллельныхъ лучей, образующихъ съ осью уголъ наклопенія u . Эти лучи по выходѣ изъ системы соберутся въ некоторой точкѣ A' фокусной плоскости $\Phi'A'$ на разстояніи h' отъ осн. Очевидно уголъ u представляетъ тотъ уголъ, подъ которымъ видныя солнце (видимый діаметръ солнца), а h' представляетъ линейную величину изображенія солнца.

Такъ какъ

$$\frac{h'}{\operatorname{tg} u} = F,$$

то можемъ сказать, что *первое фокусное разстояніе F системы равняется линейной величинѣ изображенія бесконечно удален-*

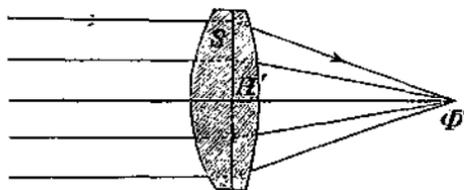


фиг. 25

наго предмета, раздѣленной на тангенсъ угла подъ которымъ виденъ этотъ предметъ.

Точно также говорятъ, что *второе фокусное разстояніе F' равняется отношенію линейной величины предмета къ тангенсу угла, подъ которымъ видно изображеніе предмета, находящееся въ бесконечности.*

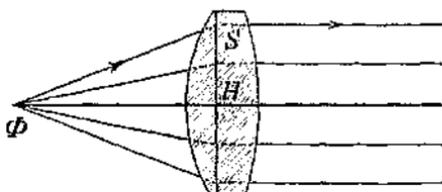
§ 17. **Значеніе главныхъ плоскостей.** Мы видѣли (§ 14), что лучъ, идущій въ первой срединѣ параллельно осн, и сопряженный съ нимъ лучъ, идущій въ послѣдней срединѣ, пересѣкаются въ точкѣ, лежащей во второй главной плоскости; поэтому если на систему падаетъ пучекъ лучей, параллельныхъ осн (фиг. 26), то продолживъ ихъ до пересѣченія со второю главною плоскостью H' и соединивъ точки пе-



фиг. 26.

ресѣченія со вторымъ главнымъ фокусомъ Φ' , мы получимъ направленія лучей, вышедшихъ изъ системы въ послѣдней срединѣ ее.

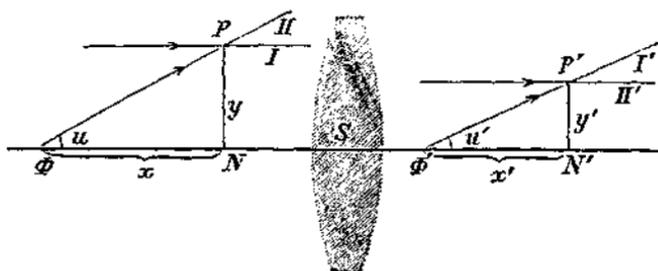
Такія же разсужденія можно примѣнить и въ томъ случаѣ, когда лучи идутъ параллельно оси въ послѣдней срединѣ (фиг. 27).



фиг. 27.

Примѣчаніе. Если мы говоримъ о пересѣченіи лучей, то имѣемъ въ виду вообще пересѣченіе геометрическихъ продолженій ихъ.

§ 18. Самая общая и простая форма уравненій для изображеній, получаемыхъ посредствомъ системъ. Теперь выведемъ формулы, дающія возможность по данному положенію точки P (фиг. 28) опредѣлять положеніе точки P' , сопряженной съ первою.



фиг. 28.

Представимъ себѣ, что черезъ точку P проходятъ два луча: одинъ I параллельный оси, а другой II , направляющійся изъ перваго фокуса Φ . Лучу I , идущему въ первой срединѣ параллельно оси, отвѣчаетъ въ послѣдней срединѣ сопряженный съ нимъ лучъ I' , проходящій черезъ второй фокусъ Φ' , а лучу II , направляющемуся въ первой срединѣ изъ перваго фокуса Φ , отвѣчаетъ сопряженный съ нимъ лучъ II' , идущій въ послѣдней срединѣ параллельно оси. Такъ какъ точка P находится въ пересѣченіи лучей I и II , то сопряженная съ нею точка P' находится въ пересѣченіи лучей I' и II' , соответственно сопряженныхъ съ первыми.

Фокусы Φ и Φ' мы примемъ за начальныя точки, отъ которыхъ будемъ отсчитывать разстоянія по оси, приче́мъ, какъ и раньше, по-

Примѣчаніе. Чертежъ (фиг. 28) соответствуетъ тому случаю, когда у системы одинъ фокусъ дѣйствительный, а другой—мнимый. Такія системы существуютъ (окуляръ Гюйгенса).

положительными будем считать тѣ разстоянія, которыя отсчитаны отъ упомянутыхъ точекъ вправо, а отрицательными отсчитанныя влѣво.

Пусть положеніе точки P дано посредствомъ координатъ

$$\phi N = x \text{ и } NP = y.$$

Нужно опредѣлить координаты точки P' , т. е.

$$\phi' N' = x' \text{ и } N' P' = y'.$$

y и y' будутъ считаться положительными или отрицательными, смотря потому, будутъ-ли они расположены надъ осью или подъ осью.

У насъ было уравненіе (§ 14):

$$\frac{y'}{\operatorname{tg} u} = F.$$

Далѣе, изъ \triangle -ка $\phi P N$ имѣемъ:

$$\operatorname{tg} u = \frac{y}{x}.$$

Подставивъ это значеніе для $\operatorname{tg} u$ въ предыдущее уравненіе, получимъ послѣ простыхъ преобразованій

$$y' = y \cdot \frac{F}{x} \dots \dots \dots (38)$$

Изъ \triangle -ка $\phi' P' N'$ имѣемъ:

$$y' = x' \operatorname{tg} u',$$

откуда

$$x' = \frac{y'}{\operatorname{tg} u'}.$$

Последнее уравненіе на основаніи формулы

$$F' = \frac{y}{\operatorname{tg} u'} \quad (\S 14)$$

перепишется такъ

$$x' = \frac{y'}{y} \cdot F';$$

Поэтому

$$\frac{y'}{y} = \frac{x'}{F'}.$$

Но изъ урав. (38) имѣемъ:

$$\frac{y'}{y} = \frac{F}{x};$$

слѣдовательно

$$\frac{x'}{F'} = \frac{F}{x}$$

или

$$xx' = FF' \dots \dots \dots (39)$$

Кромѣ того

$$\frac{y'}{y} = \frac{F}{x} = \frac{x'}{F'} \dots \dots \dots (40)$$

Уравненія (39) и (40) позволяютъ по даннымъ x и y опредѣлить x' и y' , если F и F' извѣстны. Мы видимъ, что формулы (39) и (40) идентичны съ формулами (22) и (23), выведенными для одной преломляющей поверхности, такъ какъ $f = -F$ и $f' = -F'$ (§ 5 — (15)).

§ 19. Угловое увеличеніе и отношеніе фокусныхъ разстояній.

На чертежѣ (фиг. 22) буквами L и L' обозначены двѣ сопряженныя точки по отношенію къ системѣ S . Черезъ точку L проходитъ лучъ I , образующій съ осью уголъ наклоненія u , а черезъ точку L' — лучъ I' , сопряженный съ первымъ и образующій уголъ наклоненія u' .

У насъ были формулы

$$F = -\frac{h'}{\operatorname{tg} u} \quad \text{и} \quad F' = \frac{h}{\operatorname{tg} u'}$$

Изъ того же чертежа (фиг. 22) слѣдуетъ, что

$$a \Phi = L \Phi \cdot \operatorname{tg} u \quad \text{и} \quad a' \Phi' = L' \Phi' \cdot \operatorname{tg} u'$$

или

$$h = -x \operatorname{tg} u \quad \text{и} \quad h' = -x' \operatorname{tg} u'$$

Подставляя эти значенія для h и h' въ первыя два равенства, получимъ:

$$F = -x' \cdot \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} \quad \text{и} \quad F' = -x \cdot \frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'}$$

откуда слѣдуетъ, что

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = -\frac{F}{x'} \quad \text{и} \quad \frac{\operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'} = -\frac{x}{F'} \dots \dots \dots (41)$$

Выраженіе $\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u}$ представляетъ угловое увеличеніе системы.

Обозначимъ его буквою A .

На основаніи равенствъ (41) пишемъ

$$A = -\frac{F}{x'} = -\frac{x}{F'} \dots \dots \dots (42)$$

Эта формула показываетъ, что по отношенію къ двумъ даннымъ сопряженнымъ точкамъ угловое увеличеніе постоянно для каждаго двухъ сопряженныхъ лучей, выходящихъ соответственно изъ этихъ точекъ. (Объ этомъ уже упоминалось въ § 11).

Мы вывели (§ 12) формулу

$$y' \cdot n' \cdot \operatorname{tg} u' = y \cdot n \cdot \operatorname{tg} u \dots \dots \dots (34)$$

или

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{y}{y'} \cdot \frac{n}{n'}$$

На основаніи этого равенства вмѣсто равенствъ (41) получимъ такія:

$$\frac{y}{y'} \cdot \frac{n}{n'} = -\frac{F'}{x'} \quad \text{и} \quad \frac{y}{y'} \cdot \frac{n}{n'} = -\frac{x}{F''}.$$

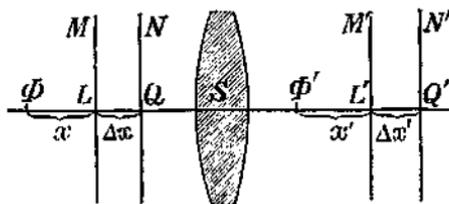
Пользуясь уравненіемъ (40) и замѣняя $\frac{y}{y'}$ въ первомъ изъ последнихъ двухъ равенствъ черезъ $\frac{F''}{x'}$, а во второмъ черезъ $\frac{x}{F'}$, мы получимъ по очереди изъ каждаго равенства постъ простыхъ преобразованій одну и ту же формулу:

$$\frac{F''}{F'} = -\frac{n'}{n} \dots \dots \dots (43)$$

Эта формула показываетъ, что *фокусныя разстоянія системы относятся, какъ показатели преломленія крайнихъ срединъ ея, при чемъ F' и F'' имѣютъ обратные знаки.*

Принимая во вниманіе равенство (15), мы видимъ, что формула (43) идентична съ формулою (14), выведенною для одной преломляющей поверхности.

§ 20. **Продольное увеличеніе и связь между увеличеніями разнаго рода.** Вообразимъ себѣ двѣ сопряженныя плоскости M и M' , пересекающія оптическую ось соответственно въ точкахъ L и L' (фиг. 29).



фиг. 29.

Положеніе точекъ L и L' опредѣляется разстояніями x и x' , для которыхъ имѣетъ мѣсто такое уравненіе

$$xx' = FF'' \dots \dots \dots (39)$$

Представимъ себѣ теперь, что плоскость M передвинулась на весьма малое разстояніе $LQ = \Delta x$ и заняла положеніе N , оставаясь перпендикулярною къ оси; тогда ей будетъ отвѣчать сопряженная плоскость N' , отстоящая отъ плоскости M' на некоторомъ разстояніи $L'Q' = \Delta x'$.

Положеніе сопряженныхъ точекъ Q и Q' опредѣляется разстояніями $x + \Delta x$ и $x' + \Delta x'$, для которыхъ имѣетъ мѣсто уравненіе:

$$(x + \Delta x)(x' + \Delta x') = FF''$$

или

$$ax' + \Delta x \cdot x' + \Delta x' \cdot x + \Delta x \cdot \Delta x' = FF'.$$

Вычтя изъ этого уравненія уравненіе (39), получимъ:

$$x' \cdot \Delta x + x \cdot \Delta x' + \Delta x \cdot \Delta x' = 0,$$

откуда имѣемъ:

$$\frac{\Delta x'}{\Delta x} = -\frac{x'}{x + \Delta x}.$$

Пусть теперь Δx безпредѣльно уменьшается, тогда $\frac{\Delta x'}{\Delta x}$ стремится къ предѣлу $-\frac{x'}{x}$.

Предѣлъ $\frac{\Delta x'}{\Delta x}$ * назовемъ *продольнымъ увеличеніемъ* и будемъ обозначать буквою G .

$$\text{Такъ что } G = -\frac{x'}{x}$$

Подставивъ въ послѣднее равенство вмѣсто x' его значеніе изъ урав. (39), получимъ

$$G = -\frac{x'}{x} = -\frac{FF'}{x^2} \dots \dots \dots (44)$$

Выпишемъ подрядъ выраженія, найденныя для равныхъ увеличеній; тогда получимъ:

$$B = \frac{y'}{y} = \frac{F'}{x} = \frac{x'}{F'} \quad (\text{поперечное увеличеніе})$$

$$A = \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u} = -\frac{F'}{x'} = -\frac{x}{F''} \quad (\text{угловое увеличеніе})$$

$$G = \frac{dx'}{dx} = -\frac{FF''}{x^2} = -\frac{x'}{x} \quad (\text{продольное увеличеніе})$$

Изъ этихъ формулъ непосредственно получаютъ такія формулы:

$$B \cdot A = -\frac{F'}{F''} \dots \dots \dots (45)$$

$$\frac{G}{B^2} = -\frac{F'}{F''} \dots \dots \dots (46)$$

Перемножая послѣднія два равенства, получимъ:

$$\frac{A \cdot G}{B} = 1 \dots \dots \dots (47)$$

§ 21. Кардинальныя точки и плоскости, проходящія черезъ нихъ.

Предложимъ себѣ найти для системы такія двѣ сопряженныя плоскости, для которыхъ $B=1$.

* Предѣлъ $\frac{\Delta x'}{\Delta x} = \frac{dx'}{dx}$ = производной отъ x' по x .

Такъ какъ $B = \frac{y'}{y} = \frac{F}{x} = \frac{x'}{F'}$, то для искоемыхъ плоскостей

имѣютъ мѣсто слѣдующія равенства:

$$\frac{y'}{y} = 1, \frac{F}{x} = 1 \text{ и } \frac{x'}{F'} = 1$$

или

$$y' = y, x = F \text{ и } x' = F'.$$

Значитъ, первая искомая плоскость отстоитъ отъ перваго фокуса на разстояніи $x = F$, а вторая отстоитъ отъ втораго фокуса на разстояніи $x' = F'$. Поэтому искомыя плоскости суть ничто иное, какъ главные плоскости, о которыхъ мы говорили въ § 14. Первое равенство $y' = y$ указываетъ намъ свойство главныхъ плоскостей, именно оно показываетъ, что предметъ, находящійся въ первой главной плоскости, даетъ изображеніе во второй главной плоскости прямое и одинаковой величины съ предметомъ. Подъ словомъ „прямое“ понимается, что если предметъ расположенъ надъ осью, то и изображеніе надъ осью и обратно: если предметъ подъ осью, то и изображеніе подъ осью.

Предложимъ себѣ теперь найти такія двѣ сопряженныя точки, для которыхъ $A = 1$.

$$\text{Такъ какъ } A = \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u} = -\frac{F}{x'} = -\frac{x}{F'},$$

то для искоемыхъ точекъ имѣютъ мѣсто слѣдующія равенства:

$$\frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u} = 1, -\frac{F}{x'} = 1 \text{ и } -\frac{x}{F'} = 1$$

или

$$\text{tg } u' = \text{tg } u, x = -F' \text{ и } x' = -F.$$

Послѣднія два равенства показываютъ, что первая точка находится отъ перваго фокуса на разстояніи $x = -F'$, а вторая отстоитъ отъ втораго фокуса на разстояніи $x' = -F$. Первую точку будемъ называть *первою узловою* точкою, а вторую — *второю узловою* точкою.

Проведа черезъ узловыя точки плоскости перпендикулярно осн, получимъ двѣ *узловыя* плоскости: *первую* и *вторую*.

Первое изъ послѣдняго ряда уравненій, т. е. $\text{tg } u' = \text{tg } u$, указываетъ намъ свойство узловыхъ точекъ, именно, что лучъ, проходящему черезъ первую узловую точку подъ угломъ наклоненія u , отвѣчаетъ сопряженный лучъ, проходящій черезъ вторую узловую точку подъ такимъ же угломъ наклоненія $u' = u$, короче говоря, *два сопряженныхъ луча, проходящихъ соответственно черезъ узловыя точки, параллельны другъ-другу*.

Такъ какъ B и A съ измѣненіемъ x получаютъ все новыя и новыя значенія, то другой пары, какъ главныхъ точекъ, такъ и узловыхъ точекъ не можетъ быть въ системѣ.

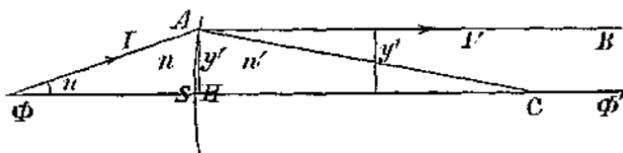
Такимъ образомъ въ системѣ различаютъ слѣдующія три пары точекъ, введенныхъ Гауссомъ:

два фокуса, двѣ главные точки и двѣ узловые точки.

Эти точки называются *кардинальными*. Каждой парѣ точекъ отвѣчаетъ пара плоскостей, о которыхъ мы уже говорили.

Геплеръ ввелъ еще новыя пары точекъ пзъ условій $B = -1$ и $A = -1$ такъ называемыя *отрицательныя* главные и *отрицательныя* узловые точки. Мы объ нихъ не будемъ говорить.

§ 22. На одну преломляющую поверхность можно смотрѣть, какъ на самую простую систему; слѣдовательно и для одной преломляющей поверхности существуютъ кардинальныя точки и соответствующія имъ плоскости.



фиг. 30.

На чертежѣ (фиг. 30) изображена преломляющая поверхность AS , разграничивающая двѣ среды, которыхъ показатели преломленія соответственно суть n и n' . Изъ перваго фокуса Φ въ первой средѣ идетъ лучъ I ; ему во второй средѣ отвѣчаетъ сопряженный лучъ I' , параллельный оси. Изъ точки пересѣченія этихъ двухъ сопряженныхъ лучей опускаемъ на ось перпендикуляръ $AH = y'$. Основаніе этого перпендикуляра, т. е. точка H , представляетъ ничто иное, какъ первую главную точку (§ 14); слѣдовательно

$$FH = F = \frac{y'}{\operatorname{tg} u}.$$

Въ виду того, что уголъ u предполагается весьма малымъ, мы принимаемъ, что $FH = FS$; поэтому $F = FS$.

Значитъ, въ случаѣ одной преломляющей поверхности главную точку H считаемъ совпадающею съ вершиною S преломляющей поверхности и говоримъ, что *фокусное разстояніе F представляетъ разстояніе вершины S отъ перваго фокуса Φ* .

Подобнымъ же образомъ мы бы могли прийти къ заключенію, что F' представляетъ разстояніе вершины S отъ втораго фокуса.

Въ § 5-омъ, когда разстоянія считались не отъ фокусовъ, а отъ вершины S , разстояніе перваго фокуса обозначалось буквою f , а вто-

рого—буквою f' и въ концѣ § 5-го было сдѣлано замѣчаніе, что

$$F = -f \text{ и } F' = -f';$$

поэтому

$$F = -\frac{nr}{n'-n} \text{ и } F' = -\frac{n'r}{n'-n} \dots \dots \dots (48)$$

Нетрудно видѣть, что для одной поверхности обѣ узловыя точки совпадаютъ съ центромъ этой поверхности, что впрочемъ очевидно сразу, такъ какъ всякій лучъ, падающій на преломляющую поверхность по направленію къ центру, не преломляется. Но можно это пояснить на основаніи формулъ. Въ самомъ дѣлѣ, мы видѣли, что первая узловая точка отстоитъ отъ перваго фокуса на разстояніи:

$$x = -F' = \frac{n'r}{n'-n}.$$

Но

$$\Phi C = \Phi S + SC = \frac{nr}{n'-n} + r = \frac{n'r}{n'-n} = -F'.$$

Слѣдовательно первая узловая точка совпадаетъ съ центромъ C . Подобнымъ образомъ можно доказать, что и вторая узловая точка совпадаетъ съ тѣмъ же центромъ C . Въ самомъ дѣлѣ, вторая узловая точка отстоитъ отъ втораго фокуса на разстояніи:

$$x' = -F = -\frac{nr}{n'-n} \text{ и } C\Phi' = S\Phi' - SC,$$

откуда:

$$-C\Phi' = -S\Phi' + SC = -\frac{n'r}{n'-n} + r = -\frac{nr}{n'-n} = -F.$$

Примѣчаніе. Легко повѣрить, что въ нашемъ случаѣ (фиг. 30) F положительное, а f отрицательное.

Для разстоянія F' за начальную точку принимается точка Φ , а для разстоянія f —точка S .

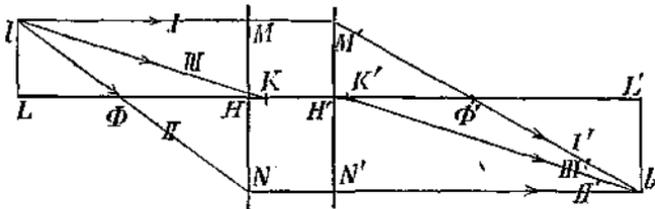
Принимая за начальную точку фокусъ Φ , мы замѣчаемъ, что точка S расположена вправо отъ Φ ; слѣдовательно разстояніе S отъ Φ , т. е. F' , положительное, какъ отсчитываемое вправо отъ начальной точки Φ . Принимая теперь за начальную точку S , мы замѣчаемъ, что точка Φ расположена влѣво отъ S и разстояніе точки Φ отъ S , т. е. f , отрицательное, такъ какъ оно отсчитывается влѣво отъ начальной точки S .

То же заключеніе вытекаетъ изъ рассмотрѣнія значеній y' , u , r , n и n' .

На чертежѣ (фиг. 30) y' и u положительныя; слѣдовательно F' , какъ равное $\frac{y'}{\operatorname{tg} u}$, положительное. Далѣе, r положительное (смот. конецъ § 2). Кроме того $n' > n$, потому что на на-

шемъ чертежѣ (фиг. 30) вторая середина представлена болѣе плотною; слѣдовательно выраженіе $\frac{m'}{n'-n}$ положительное число, а $f' (= -\frac{m'}{n'-n})$ отрицательное.

§ 23. **Построеніе изображеній при помощи кардинальныхъ точекъ.** Положимъ намъ лужно построить изображеніе предмета lL (фиг. 31). Разсуждаемъ слѣдующимъ образомъ. Лучъ I , идущій параллельно оси, пересекаетъ вторую главную плоскость въ точкѣ M' .



фиг. 31.

Соединивъ точку M' со вторымъ фокусомъ Φ' прямою, мы получимъ направленіе луча I' , сопряженнаго съ I (§ 17).

Второй лучъ II , идущій изъ l и проходящій черезъ первый фокусъ Φ , встрѣтитъ первую главную плоскость въ некоторой точкѣ N' . Лнія, идущая изъ N' параллельно оси, представитъ намъ лучъ II' , сопряженный съ лучемъ II .

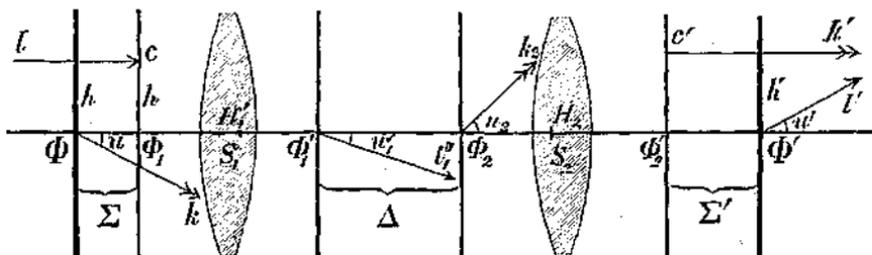
Пересѣченіе двухъ лучей I' и II' даетъ намъ точку l' , которая и будетъ изображеніемъ точки l . Опустивъ изъ l' на ось перпендикуляръ $l'L'$, получимъ изображеніе $l'L'$ предмета lL , перпендикулярнаго къ оси.

Этотъ методъ основывается на томъ, что мы выбираемъ такіе два луча, идущіе въ первой срединѣ изъ данной свѣтящейся точки l , для которыхъ легко можно начертить сопряженные. Пересѣченіе послѣднихъ даетъ изображеніе l' точки l . Мы избрали одинъ лучъ, идущій изъ l параллельно оси, а другой—проходящій черезъ первый фокусъ Φ и безъ труда могли начертить соответственно сопряженные съ ними лучи. Но легко начертить сопряженный лучъ еще и для луча III , идущаго изъ l въ первую узловую точку K . Проведя изъ второй узловой точки K' линію, параллельную лучу lK , получимъ направленіе луча III' , сопряженнаго съ лучемъ III .

Слѣдовательно, если положеніе кардинальныхъ точекъ системы извѣстно, то построеніе изображеній не представляетъ трудности. Основываясь на этомъ, можно однимъ только черченіемъ изслѣдовать, какъ измѣняется положеніе и величина изображенія въ зависимости отъ измѣненія положенія предмета.

§ 24. **Сведение двух оптических системъ въ одной сложной оптической системѣ.** Представимъ себѣ, что намъ даны двѣ системы S_1 и S_2 (фиг. 32), имѣющія общую оптическую ось. Фокусъ первой системы S_1 обозначимъ черезъ Φ_1 и Φ_1' , а второй системы S_2 —черезъ Φ_2 и Φ_2' ; затѣмъ, фокусныя разстоянія первой системы S_1 обозначимъ черезъ F_1 и F_1' , а второй S_2 —черезъ F_2 и F_2' .

Системы S_1 и S_2 , вмѣстѣ взятыя, представляютъ собою совокупность преломляющихъ сферическихъ поверхностей, которыхъ центры лежатъ на одной прямой, иначе говоря, системы S_1 и S_2 въ совокупности представляютъ одну сложную систему (S_1 и S_2). Фокусы слож-



фиг. 32.

пой системы (S_1 и S_2) назовемъ буквами Φ и Φ' , а фокусныя разстоянія—буквами F и F' .

Наша задача состоитъ въ томъ, чтобы по даннымъ, вполне опредѣляющимъ системы S_1 и S_2 , опредѣлить величины, вполне опредѣляющія сложную систему (S_1 и S_2). Именно мы предполагаемъ, что положеніе фокусовъ и фокусныя разстоянія данныхъ системъ S_1 и S_2 извѣстны, и по этимъ извѣстнымъ намъ нужно опредѣлить положеніе фокусовъ и фокусныя разстоянія сложной системы (S_1 и S_2).

Обозначимъ разстояніе перваго фокуса Φ сложной системы (S_1 и S_2) отъ перваго фокуса Φ_1 отдельной системы S_1 черезъ Σ , а разстояніе втораго фокуса Φ' сложной системы (S_1 и S_2) отъ втораго фокуса Φ_2' отдельной системы S_2 черезъ Σ' . Положеніе фокусовъ сложной системы опредѣлится, если будемъ знать разстоянія $\Sigma = -\Phi\Phi_1$ и $\Sigma' = \Phi_2'\Phi'$. Разстояніе перваго фокуса Φ_2 системы S_2 отъ втораго фокуса Φ_1' системы S_1 обозначимъ черезъ Δ . Это разстояніе называется *интерваломъ* и по принятому нами правилу будетъ считаться положительнымъ, если Φ_2 вправо отъ Φ_1' и отрицательнымъ, если Φ_2 влѣво отъ Φ_1' . Если извѣстно положеніе на оси фокусовъ Φ_1' и Φ_2 , то извѣстно и Δ .

Параллельный оси лучъ lc , падающій на сложную систему, по выходѣ изъ нея долженъ проходить черезъ второй фокусъ Φ' сложной системы (S_1 и S_2). Это непосредственно слѣдуетъ изъ самого

опредѣленія фокуса Φ' . Положимъ, что лучъ lc по выходѣ изъ системы (S_1 и S_2), направляясь изъ фокуса Φ' , пойдетъ по линіи $\Phi'U'$. Тогда между угломъ наклоненія u' и высотой $h = c\Phi_1$ будетъ имѣть мѣсто связь:

$$F'' = \frac{h}{\operatorname{tg} u'} \dots \dots \dots (a)$$

Съ другой стороны, разсматривая тотъ же лучъ lc по отношенію къ отдѣльной системѣ S_1 , мы заключаемъ, что онъ долженъ между прочимъ пройти и черезъ фокусъ Φ_1' системы S_1 , направляясь примерно по прямой $\Phi_1'U_1'$, причемъ между угломъ наклоненія u_1' и высотой $h = c\Phi_1$ будетъ существовать такая связь:

$$F_1' = \frac{h}{\operatorname{tg} u_1'}$$

Такимъ образомъ лучъ lc по выходѣ изъ системы S_1 направится по $\Phi_1'U_1'$, затѣмъ упадетъ на систему S_2 , а выйдя изъ системы S_2 , приметъ окончательное направленіе $\Phi'U'$, потому что, выходя изъ системы S_2 , онъ тѣмъ же самымъ выходитъ и изъ сложной системы (S_1 и S_2). Принимая во вниманіе то обстоятельство, что лучъ $\Phi_1'U_1'$, выйдя изъ точки Φ_1' и упавъ на систему S_2 , по выходѣ изъ нея, проходитъ черезъ точку Φ' , мы приходимъ къ заключенію, что точки Φ_1' и Φ' суть сопряженные точки по отношенію къ системѣ S_2 и для нихъ имѣетъ мѣсто урав. (39) параграфа 18. Примѣняя ур. (39) къ системѣ S_2 , мы должны величины, входящія въ это уравненіе, замѣнить слѣдующимъ образомъ: вмѣсто F взять F_2 , вмѣсто F'' взять F_2' , вмѣсто x' взять Σ' и вмѣсто x взять $-\Delta$. Что въ нашемъ случаѣ $x = -\Delta$, слѣдуетъ изъ того, что само Δ выражаетъ разстояніе точки Φ_2 отъ точки Φ_1' и оно согласно чертежу (фиг. 32) положительное (Φ_2 вправо отъ Φ_1'); тогда какъ x по отношенію къ системѣ S_2 должно выражать разстояніе точки Φ_1' отъ точки Φ_2 и оно согласно тому же чертежу должно считаться отрицательнымъ, такъ какъ точка Φ_1' влѣво отъ точки Φ_2 ; поэтому формула (39) параграфа 18 въ примѣненіи къ нашему случаю переписывается такъ:

$$-\Delta \cdot \Sigma' = F_2 \cdot F_2',$$

откуда находимъ, что

$$\Sigma' = -\frac{F_2 F_2'}{\Delta}$$

Далѣе, въ формулѣ (a) этого параграфа умножимъ числителя и знаменателя на $\operatorname{tg} u_1'$, тогда получимъ:

$$F'' = \frac{h}{\operatorname{tg} u_1'} \cdot \frac{\operatorname{tg} u_1'}{\operatorname{tg} u'}$$

$$\text{по } \frac{h}{\text{tg } u_1'} = F_1' \text{ и } \frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u_1'} = A_2,$$

гдѣ A_2 выражаетъ угловое увеличеніе системы S_2 . На основаніи § 19 — (форм. 41) напишемъ:

$$\frac{\text{tg } u'}{\text{tg } u_1'} = A_2 = - \frac{-\Delta}{F_2'} = \frac{\Delta}{F_2'};$$

поэтому

$$F' = \frac{F_1' \cdot F_2'}{\Delta}.$$

Теперь возьмемъ во вниманіе лучъ ϕk , падающій на сложную систему, направляясь изъ фокуса ея ϕ . Этотъ лучъ по выходѣ изъ сложной системы направляется параллельно оси, примѣрно по прямой $e'k'$. Такъ какъ по выходѣ изъ второй отдѣльной системы S_2 этотъ лучъ направляется параллельно оси, то онъ долженъ былъ по пути пройти черезъ первый фокусъ ϕ_2 системы S_2 . Отсюда заключаемъ, что точки ϕ и ϕ_2 по отношенію къ отдѣльной системѣ S_1 суть сопряженныя точки; поэтому на основаніи урав. (39) пишемъ:

$$\Sigma \cdot \Delta = F_1 \cdot F_1',$$

откуда

$$\Sigma = \frac{F_1 \cdot F_1'}{\Delta}.$$

Далѣе, на основаніи чертежа (фиг. 32)

$$F = \frac{h'}{\text{tg } u} = \frac{h'}{\text{tg } u_2} \cdot \frac{\text{tg } u_2}{\text{tg } u},$$

по

$$\frac{h'}{\text{tg } u_2} = F_2 \text{ и } \frac{\text{tg } u_2}{\text{tg } u} = A_1,$$

гдѣ подъ A_1 понимается угловое увеличеніе системы S_1 .

На основаніи § 19 — (форм. 41.), пишемъ

$$\frac{\text{tg } u_2}{\text{tg } u} = A_1 = - \frac{F_1}{\Delta};$$

слѣдовательно

$$F = - \frac{F_2 \cdot F_1}{\Delta}.$$

Такимъ образомъ уравненія, опредѣляющія сложную систему (S_1 и S_2), представляются такъ:

$$\Sigma = \frac{F_1 \cdot F_1'}{\Delta} \quad \Sigma' = - \frac{F_2 \cdot F_2'}{\Delta} \quad \dots \quad (49)$$

$$F = - \frac{F_1 \cdot F_2}{\Delta}; \quad F' = \frac{F_1' \cdot F_2'}{\Delta} \quad \dots \quad (50)$$

Последніи два урав. для F' и F'' показываютъ, что двѣ системы съ конечными фокусными расстояніями сводятся къ одной системѣ тоже съ конечными фокусными расстояніями; но это имѣетъ мѣсто, пока Δ не равно нулю.

Предположимъ, что H_1' (фиг. 32) есть вторая главная точка системы S_1 , а H_2 — первая главная точка системы S_2 . Обозначимъ расстояние точки H_2 отъ точки H_1' черезъ D . Тогда на основаніи чертежа (фиг. 32) напишемъ

$$\Phi_1' \Phi_2 = H_1' H_2 - (H_1' \Phi_1' + \Phi_2 H_2) = D - (-F_1' + F_2)$$

или

$$\Delta = F_1' - F_2 + D \dots \dots \dots (51).$$

§ 25. **Телескопическая система.** Предположимъ, что въ формулахъ (50) $\Delta = 0$, т. е. что второй фокусъ Φ_1' первой отдѣльной системы S_1 совпадаетъ съ первымъ фокусомъ Φ_2 второй отдѣльной системы S_2 ; тогда

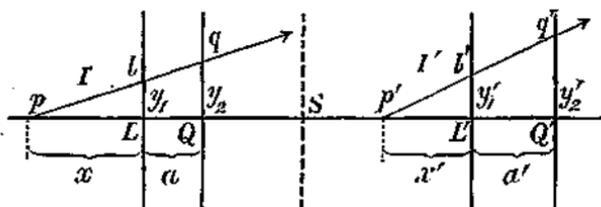
$$F = \infty \text{ и } F'' = \infty$$

При такихъ условіяхъ сложная система (S_1 и S_2) обращается въ особую систему, которая называется *телескопической*.

Понятно, что параллельные лучи, падающіе на телескопическую систему, по выходѣ изъ нея остаются параллельными.

Телескопическая система представляетъ особый случай, для котораго уравненія (49) и (50) теряютъ свое значеніе.

Выведемъ уравненія, показывающія, по какимъ законамъ происходитъ изображеніе въ телескопической системѣ.



фиг. 33.

Прежде всего замѣтимъ, что въ § 14—ур. (b) было выведено равенство

$$F'' = \frac{d'}{v_2 - v_1}.$$

Въ случаѣ телескопической системы будемъ имѣть:

$$F'' = \infty, \text{ т. е. } \frac{d'}{v_2 - v_1} = \infty$$

Такъ какъ подъ d' понимается пѣкоторая конечная величина *), то последнее равенство можетъ имѣть мѣсто не иначе, какъ при условіи, что

$$v_2 - v_1 = 0$$

или

$$v_2 = v_1;$$

отсюда заключаемъ, что въ телескопической системѣ для всякой пары сопряженныхъ плоскостей поперечное увеличеніе остается однимъ и тѣмъ же, т. е. въ телескопической системѣ оно постоянно.

Пусть на чертежѣ (фиг. 33) прямыя I и I' представляютъ два сопряженныхъ луча для пѣкоторой телескопической системы S , которая на чертежѣ не изображена. Далѣе, пусть L и L' , а также Q и Q' представляютъ двѣ опредѣленныя пары сопряженныхъ плоскостей.

Изъ чертежа слѣдуетъ:

$$\frac{Qq}{Ll} = \frac{pQ}{pL},$$

откуда

$$\frac{Qq - Ll}{Ll} = \frac{pQ - pL}{pL}$$

или

$$\frac{y_2 - y_1}{y_1} = \frac{a}{x} \dots \dots \dots (\alpha)$$

Подобнымъ образомъ можемъ найти, что

$$\frac{y_2' - y_1'}{y_1'} = \frac{a'}{x'} \dots \dots \dots (\beta)$$

Называя поперечное увеличеніе для телескопической системы черезъ v , можемъ написать:

$$v = \frac{y_1'}{y_1} = \frac{y_2'}{y_2}, \text{ откуда имѣемъ, что } y_1' = vy_1 \text{ и } y_2' = vy_2.$$

Подставивъ найденныя значенія для y_1' и y_2' въ ур. (β) , получимъ:

$$\frac{vy_2 - vy_1}{vy_1} = \frac{a'}{x'}$$

или

$$\frac{y_2 - y_1}{y_1} = \frac{a'}{x'}.$$

На основаніи послѣдняго равенства и равенства (α) приходимъ къ заключенію, что

*) Расстояніе d' (фиг. 22) можетъ даже оставаться постояннымъ въ то время, какъ остальные элементы будутъ измѣняться соответственно измѣненію фокусныхъ разст. F и F' стремящихся къ ∞ .

$$\frac{a'}{x'} = \frac{a}{x},$$

откуда:

$$x' = x \frac{a'}{a}. \quad (52)$$

Такимъ образомъ съ помощью ур. (52) по заданному x можемъ опредѣлить x' , предполагая, что $\frac{a'}{a}$ известно.

Вообразимъ себѣ на оси двѣ точки p_1 и p_2 , опредѣляемыя разстояніями x_1 и x_2 отъ пѣкоторой точки p (фиг. 33). Пусть соответственно сопряженныя съ ними точки будутъ p_1' и p_2' , опредѣляемыя разстояніями x_1' и x_2' отъ точки p_1' , сопряженной съ p . Тогда будутъ имѣть мѣсто равенства:

$$x_1' = x_1 \frac{a'}{a}$$

и

$$x_2' = x_2 \frac{a'}{a},$$

откуда имѣемъ, что

$$x_2' - x_1' = (x_2 - x_1) \cdot \frac{a'}{a};$$

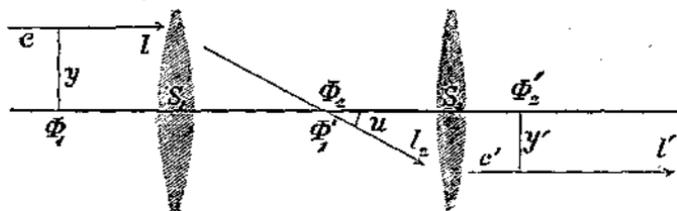
следовательно

$$\frac{a'}{a} = \frac{x_2' - x_1'}{x_2 - x_1} = G,$$

гдѣ по прежнему подѣ G понимается продольное увеличеніе системы.

Поэтому приходимъ къ заключенію, что для телескопической системы продольное увеличеніе постоянно.

Положимъ, что чертежъ (фиг. 34) изображаетъ телескопическую систему, составленную изъ двухъ отдѣльныхъ системъ S_1 и S_2 такъ,



фиг. 34.

что второй фокусъ Φ_1' первой системы S_1 совпадаетъ съ первымъ фокусомъ Φ_2 второй системы S_2 .

Лучъ cl , падая на первую систему S_1 параллельно оси, пройдетъ черезъ общій фокусъ, который на чертежѣ обозначенъ двумя

буквами Φ_2 и Φ_1' , примерно по направлению прямой $\Phi_2 l_2$ и затѣмъ по выходѣ изъ телескопической системы направится параллельно оси примерно по прямой $c'l'$.

Лучи cl и $\Phi_2 l_2$ суть сопряженные по отношенію къ отдѣльной системѣ S_1 ; слѣдовательно можемъ написать:

$$F_1' = -\frac{y}{\operatorname{tg} u}.$$

Далѣе, лучи $\Phi_2 l_2$ и $c'l'$ суть сопряженные лучи относительно отдѣльной системѣ S_2 ; слѣдовательно можемъ написать:

$$F_2 = \frac{y'}{\operatorname{tg} u'}.$$

Отсюда находимъ, что попережное увеличеніе телескопической системы выразится такъ:

$$v = \frac{y'}{y} = \frac{F_2}{F_1'} \dots \dots \dots (53)$$

Формула (53) показываетъ, что если F_2 и F_1' одинаковыхъ знаковъ, то телескопическая система даетъ прямое изображеніе. Такой случай будетъ имѣть мѣсто, когда первая отдѣльная система S_1 будетъ собирательная, а вторая S_2 — разсѣвательная. Галилеева труба представляетъ такой случай.

Если же F_2 и F_1' разныхъ знаковъ, то телескопическая система даетъ обратное изображеніе. Такъ бываетъ, когда обѣ отдѣльныя системы собирательныя (§ 28) и такой случай представляетъ астрономическая труба Кеплера.

Замѣтимъ, что хотя для телескопической системы имѣютъ мѣсто такія выраженія:

$$F = \infty \text{ и } F' = \infty,$$

по отношенію фокусныхъ разстояній F и F' есть величина конечная, такъ какъ мы видѣли, что для всякой системы существуетъ соотношеніе:

$$\frac{F'}{F} = -\frac{n'}{n}.$$

Кромѣ того замѣтимъ, что

$$F' = \frac{F_1' \cdot F_2'}{\Delta} \text{ и } F = -\frac{F_1 \cdot F_2}{\Delta};$$

поэтому

$$\frac{F'}{F} = -\frac{n'}{n} = -\frac{F_1' \cdot F_2'}{F_1 \cdot F_2} \dots \dots \dots (\gamma)$$

Въ виду того, что и для телескопической системы отношеніе $\frac{F'}{F}$ остается конечнымъ, приходимъ къ заключенію, что всё тѣ

формулы, которыя были выведены для произвольной системы вообще, будутъ имѣть мѣсто и для телескопической системы въ томъ случаѣ, если въ нихъ входятъ фокусныя разстоянія F и F' только въ видѣ отношенія $\frac{F'}{F}$; слѣдовательно для телескопической системы имѣють мѣсто формулы (45) и (46); поэтому можемъ написать и для телескопической системы такое равенство:

$$AB = - \frac{F'}{F''} = \frac{n}{n'},$$

откуда:

$$A = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{B} \dots \dots \dots (\delta)$$

Такъ какъ по доказанному въ случаѣ телескопической системы B , равное v , постоянно, то формула (δ) показываетъ, что и *угловое увеличеніе въ телескопической системѣ постоянно*, т. е. оно сохраняетъ одно и то же значеніе для каждой пары сопряженныхъ точекъ на оси.

На основаніи ур. (46) пишемъ такое равенство:

$$\frac{G}{B^2} = + \frac{n'}{n},$$

откуда:

$$G = \frac{n'}{n} \cdot B^2 \dots \dots \dots (\epsilon)$$

Подставивъ въ ур. (δ) и (ε) вмѣсто B найденное для него значеніе изъ ур. (53), получимъ:

$$A = \frac{n}{n'} \cdot \frac{F_1'}{F_2} \dots \dots \dots (54)$$

и

$$G = \frac{n'}{n} \cdot \left(\frac{F_2'}{F_1'} \right)^2 \dots \dots \dots (55)$$

Подставляя въ ур. (54 и (55) вмѣсто $\frac{n'}{n}$ значеніе $\frac{F_1'}{F_1} \cdot \frac{F_2'}{F_2}$ найденное изъ ур. (7), и дѣлая надлежащія сокращенія, получимъ:

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{F_1}{F_2'} \\ G &= \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{F_2'}{F_1'} \\ B &= \frac{F_2}{F_1'} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (56)$$

Кромѣ того было выведено:

Предположимъ, что крайнія средины, а также средины между отдельными системами S_1 и S_2 одинаковы. Такой случай представляетъ подзорная труба.

Тогда на основаніи урав.

$$\frac{F''}{F'} = -\frac{n'}{n}$$

получимъ такія равенства:

$$F_1 = -F_1' \text{ и } F_2 = -F_2'$$

и урав. (56) переписнутся такъ:

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{F_1}{F_2} \\ B &= -\frac{F_2}{F_1} = \frac{1}{A} \\ G &= \left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2 = B^2 = \frac{1}{A^2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (57).$$

Изъ этихъ равенствъ легко получается такое равенство:

$$\frac{A \cdot G}{B} = 1.$$

Изъ ур. (57) видимъ, что угловое увеличеніе обратно поперечному увеличенію.

Покажемъ еще, что *отношеніе диаметровъ двухъ цилиндрическихъ пучковъ лучей, сопряженныхъ по отношенію къ телескопической системѣ, равно поперечному увеличенію.*

Сначала разсмотримъ случай, когда лучи параллельны оси, какъ на чертежѣ (фиг. 34)

Въ этомъ случаѣ сразу получаемъ, что

$$B = \frac{y'}{y},$$

гдѣ подъ y' и y понимаются диаметры цилиндрическихъ пучковъ свѣта.

Чертежъ (фиг. 35) представляетъ случай, когда цилиндрическіе пучки свѣта наклонны къ оси. Пусть диаметръ падающаго на систему пучка будетъ $\Phi_1 q$, а диаметръ выходящаго изъ системы пучка пусть будетъ $\Phi_2' q'$.

Тогда, принимая $c\Phi_1 = y$ и $c'\Phi_2' = y'$, будемъ имѣть:

$$\frac{\Phi_2' q'}{\Phi_1 q} = \frac{c'\Phi_2' \cos u'}{c\Phi_1 \cos u} = \frac{y'}{y} \cdot \frac{\cos u'}{\cos u},$$

но такъ какъ u и u' предполагаются весьма малыми, то можно принять:

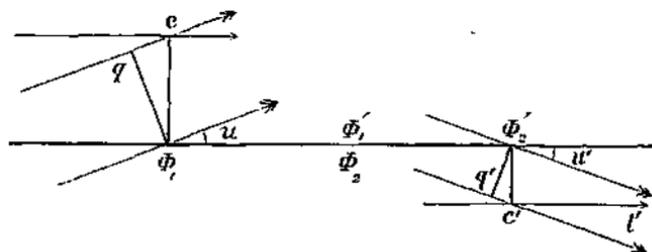
$$\cos u' = \cos u = 1$$

и получимъ:

$$\frac{\Phi_2' q'}{\Phi_1 q} = B,$$

что и требовалось доказать.

Понятно, что двѣ телескопическія системы сводятся къ одной тоже телескопической системѣ; а телескопическая и конечная системы



фиг. 35.

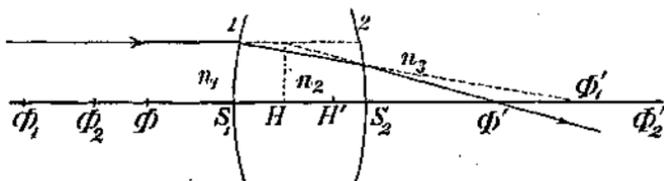
сводятся къ конечной системѣ. Поэтому, обратно, всякую конечную систему можно разсматривать, какъ составленную изъ конечной и телескопической. Подъ конечную систему понимается всякая система, не телескопическая.

Замѣтимъ еще, что одна преломляющая плоскость дѣйствуетъ подобно телескопической системѣ (смотри ур. 23 а).

§ 26. Сведеніе нѣсколькихъ оптическихъ системъ къ одной.

Мы видѣли (§ 24), что двѣ системы можно свести къ одной. Если бы намъ были даны не двѣ, а больше, напр. системы *I*, *II*, *III* и т. д., то мы сначала системы *I* и *II* свели бы къ одной (*I, II*), затѣмъ систему (*I, II*) и *III* въ свою очередь свели бы къ одной (*I, II, III*) и т. д.

§ 27. Система, состоящая изъ двухъ сферическихъ преломляющихъ поверхностей. Примѣнимъ наши выводы, изложенные въ предыдущихъ параграфахъ, къ отдѣльнымъ случаямъ.



фиг. 36.

Пусть у насъ имѣется система, состоящая изъ двухъ преломляющихъ поверхностей 1 и 2 (фиг. 36). Обозначимъ радиусы этихъ поверхностей соответственно черезъ r_1 и r_2 , а показатели преломленія

средины, разграниченныхъ поверхностями, — соответственно через n_1 , n_2 и n_3 . Эту систему мы будемъ разсматривать, какъ сложную систему, составленную изъ двухъ отдѣльныхъ системъ, изъ которыхъ первая есть преломляющая поверхность 1, а вторая—поверхность 2. Наша задача состоитъ въ томъ, чтобы найти элементы, опредѣляющіе нашу сложную систему по заданнымъ элементамъ отдѣльныхъ системъ. Элементы, опредѣляющіе каждую изъ преломляющихъ поверхностей суть:

- 1) положеніе вершинъ S_1 и S_2 сферическихкихъ поверхностей 1 и 2,
- 2) величины и знаки радиусовъ r_1 и r_2
- и 3) величины показателей преломленія n_1 , n_2 и n_3 .

Въ силу сказаннаго въ § 22, какіе бы ни были радиусы r_1 и r_2 , имѣютъ мѣсто слѣдующія равенства:

$$F_1 = \frac{n_1 r_1}{n_2 - n_1} \quad \text{и} \quad F_1' = -\frac{n_2 r_1}{n_2 - n_1} \quad \text{для поверхности 1,}$$

$$F_2 = \frac{n_3 r_2}{n_3 - n_2} \quad \text{и} \quad F_2' = -\frac{n_3 r_2}{n_3 - n_2} \quad \text{для поверхности 2,}$$

гдѣ буквы F_1 , F_1' , F_2 и F_2' обозначаютъ соответственно фокусныя разстоянія поверхностей 1 и 2. Вспомнивъ сказанное въ концѣ параграфа 2, мы можемъ замѣтить, что радиусы считаются положительными или отрицательными, смотря по тому, падаетъ-ли свѣтъ на выпуклую или вогнутую поверхности. Кромѣ того вспомнимъ, что согласно съ § 22 фокусное разстояніе отдѣльной преломляющей поверхности представляетъ разстояніе вершины этой поверхности отъ фокуса ея; поэтому выше написанныя уравненія вполне опредѣляютъ положеніе фокусовъ обѣихъ поверхностей по отношенію къ самимъ поверхностямъ.

Назовемъ фокусы поверхности 1 буквами Φ_1 и Φ_1' , фокусы поверхности 2 буквами Φ_2 и Φ_2' , а фокусы всей сложной системы буквами Φ и Φ' .

Намъ нужно найти:

- 1) фокусныя разстоянія F и F' сложной системы,
- 2) разстояніе Σ перваго фокуса Φ сложной системы отъ перваго фокуса Φ_1 поверхности 1
- и 3) разстояніе Σ' фокуса Φ' отъ втораго фокуса Φ_2' второй поверхности 2.

Эту задачу рѣшаемъ на основаніи формулъ параграфа 24. Въ концѣ означеннаго параграфа была выведена общая формула

$$\Delta = F_1' - F_2 + D \quad \dots \quad (51).$$

Такъ какъ главныя точки сферич. поверхности совпадаютъ

съ вершиною ея, то въ нашей задачѣ подъ D понимается разстояніе вершины S_2 отъ вершины S_1 . Обозначимъ это разстояніе черезъ d . Оно будетъ у насъ всегда считаться положительнымъ, такъ какъ за вторую поверхность мы принимаемъ правую поверхность; слѣдовательно вершина S_2 всегда будетъ вправо отъ S_1 .

Замѣчаемъ, что

$$F_1' = -\frac{n_2 r_1}{n_2 - n_1} \quad \text{и} \quad F_2 = \frac{n_2 r_2}{n_3 - n_2};$$

поэтому будемъ имѣть:

$$\Delta = -\frac{n_2 r_1 (n_3 - n_2) + n_2 r_2 (n_2 - n_1) - (n_2 - n_1) (n_3 - n_2) d}{(n_2 - n_1) (n_3 - n_2)}.$$

Назовемъ для краткости числителя послѣдней дроби буквою N ; тогда можемъ написать:

$$\Delta = -\frac{N}{(n_2 - n_1) (n_3 - n_2)}.$$

На основаніи послѣдней формулы и формулъ параграфа 24 можемъ въ свою очередь написать такіа равенства:

$$\left. \begin{aligned} F &= -\frac{F_1 \cdot F_2}{\Delta} = \frac{n_1 n_2 r_1 r_2}{N} \\ F' &= \frac{F_1' \cdot F_2'}{\Delta} = -\frac{n_2 n_3 r_1 r_2}{N} \\ \Sigma &= \frac{F_1 \cdot F_1'}{\Delta} = \frac{n_1 n_2 r_1^2 (n_3 - n_2)}{N(n_2 - n_1)} \\ \Sigma' &= -\frac{F_2 F_2'}{\Delta} = -\frac{n_2 n_3 r_2^2 (n_2 - n_1)}{N(n_3 - n_2)} \\ N &= n_2 r_1 (n_3 - n_2) + n_2 r_2 (n_2 - n_1) - d(n_2 - n_1) (n_3 - n_2) \end{aligned} \right\} (58.)$$

Послѣднія уравненія (58) опредѣляютъ нашу сложную систему по элементамъ отдѣльныхъ системъ 1 и 2.

На основаніи послѣднихъ уравненій легко опредѣлять положеніе главныхъ точекъ H и H' нашей сложной системы, пользуясь самымъ опредѣленіемъ точекъ H и H' (см. § 14); по положеніе этихъ точекъ опредѣляютъ еще иначе, именно опредѣляютъ разстояніе ихъ отъ вершинъ соответствующихъ прелом. поверхностей.

Изъ чертежа (фиг. 36) имѣемъ:

$$\begin{aligned} S_1 H &= \Phi H - \Phi S_1 = \Phi H - (\Phi_1 S_1 - \Phi_1 \Phi), \\ S_2 H' &= H' \Phi' - S_2 \Phi' = \Phi' H' - (S_2 \Phi_2' - \Phi' \Phi_2'). \end{aligned}$$

Разстояніе первой главной точки H отъ вершины S_1 поверхности 1 обозначимъ черезъ Ψ , а разстояніе H' отъ верш. S_2 поверхности 2 обозначимъ черезъ Ψ' .

Вспомнив правило знаковъ, мы можемъ послѣднія два равенства переписать такъ:

$$\begin{aligned} \Psi &= F - F_1 + \Sigma \\ -\Psi' &= -F' + F_2' - \Sigma' \end{aligned}$$

или

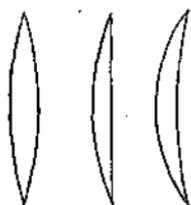
$$\begin{aligned} \Psi &= F - F_1 + \Sigma \\ \Psi' &= F' - F_2' + \Sigma' ; \end{aligned}$$

поэтому на основ. ур. (58) будемъ имѣть:

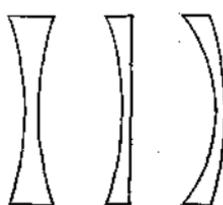
$$\left. \begin{aligned} \Psi &= \frac{n_1 r_1 d (n_3 - n_2)}{N} \\ \Psi' &= -\frac{n_3 r_2 d (n_2 - n_1)}{N} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (59)$$

§ 28. **Линзы (чечевицы).** Примѣнимъ сказанное въ послѣднемъ параграфѣ къ линзамъ. Подъ *линзой* или *чечевицею* понимается вообще прозрачное тѣло, ограниченное двумя сферическими поверхностями; въ частномъ случаѣ одна изъ поверхностей можетъ быть плоскость. Мы будемъ имѣть въ виду линзы изъ однороднаго вещества. Линзы обыкновенно дѣлаются изъ стекла и тогда такія линзы называются сферическими стеклами. Линзы раздѣляются на два типа: *собирающія*, которыя въ срединѣ толще, чѣмъ по краямъ, и *разсѣивающія*, которыя въ срединѣ тоньше, чѣмъ по краямъ. Но важно замѣтить, что вообще *собирающею системою* называется система, у которой первое фокусное разстоянiе F положительное, если же первое фокусное разстоянiе F отрицательное, то система называется *разсѣивающею*.

На чертежѣ (фиг. 37) изображены три рода собирающихъ линзъ, на чертежѣ (фиг. 38) изображены три рода разсѣивающихъ линзъ.



фиг. 37.



фиг. 38.

Такъ какъ линзы предполагаются въ воздухѣ, то для нихъ первая и вторая средины одинаковы—именно воздухъ; поэтому

$$n_1 = n_3 .$$

Обозначимъ показателя преломленiя вещества линзы относитель-

по воздуха, т. е. $\frac{n_2}{n_1}$, через n , такъ что будемъ имѣть:

$$\frac{n_2}{n_1} = n$$

или

$$n_2 = n_1 n.$$

Если въ ур. (58) и (59) примемъ, что

$$n_1 = n_3 \text{ и } n_2 = n_1 n$$

и сдѣлаемъ надлежащія сокращенія, то мы получимъ:

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{n r_1 r_2}{N} = -F' \\ \gamma &= -\frac{n r_1^2}{N}; \gamma' = \frac{n r_2^2}{N} \\ \Psi &= \frac{d r_1 (1-n)}{N}; \Psi' = \frac{d r_2 (1-n)}{N} \\ \text{по теперь:} \\ N &= (n-1) [(r_2 - r_1) n - d(1-n)] \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (60)$$

Легко видѣть, что

$$\frac{\Psi'}{\Psi} = \frac{r_2}{r_1} \dots \dots \dots (61)$$

Первое изъ равенствъ (60) показываетъ, что *у всякой линзы фокусныя разстоянія одинаковы по величинѣ, но съ обратными знаками.*

Поэтому фокусы линзы лежатъ по разныя стороны ея.

На основаніи § 21 для главныхъ точекъ имѣютъ мѣсто равенства:

$$x = F \text{ и } x' = F',$$

а для узловыхъ точекъ:

$$x_1 = -F' \text{ и } x_1' = -F.$$

Въ случаѣ линзъ имѣемъ:

$$F' = -F;$$

поэтому

$$x = x_1 \text{ и } x' = x_1',$$

т. е. *въ линзахъ главные точки соответственно совпадаютъ съ узловыми точками.*

Значитъ, линзы опредѣляются положеніемъ четырехъ точекъ:

$$F, F', H \text{ и } H'.$$

§ 29. **Изображения, производимыя линзами.** Изображения, производимыя линзами, происходят по законамъ, выражаемымъ уравненіями:

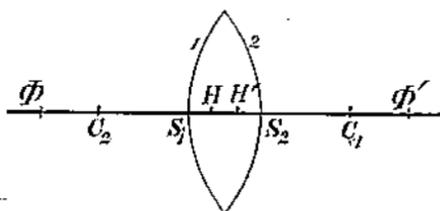
$$xx' = -F^2$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{F}{x},$$

которые получаются изъ ур. (39) и (40) при $F = -F'$.

Построеніе изображеній производится по указаніямъ въ § 23 съ тою только разницею, что въ случаѣ линзъ (въ воздухѣ) узловыя точки K и K' совпадаютъ съ главными точками H и H' .

§ 30. **Частные случаи линзъ.** а) Двояковыпуклая линза.



фиг. 39.

Пусть чертёжъ (фиг. 39) изображаетъ двояковыпуклую линзу изъ стекла, котораго показатель преломленія относительно воздуха есть $n = \frac{3}{2}$.

Согласно принятымъ условіямъ относительно знаковъ радиусъ r_1 первой поверхности 1 считается положительнымъ, а радиусъ r_2 второй поверхности 2 считается отрицательнымъ. Допустимъ еще, что абсолютная величина того и другого радиуса одна и та же и назовемъ ее буквою r ; тогда

$$r_1 = -r_2 = r.$$

Въ такомъ случаѣ на основаніи ур. (60) будемъ имѣть:

$$F = -\frac{3}{2} \cdot \frac{r^2}{N} = -F',$$

$$\Psi = -\frac{dr}{2N} = -\Psi'$$

и
$$N = \frac{1}{2} \left[-2r \cdot \frac{3}{2} - d \left(-\frac{1}{2} \right) \right] = -\frac{3}{2}r + \frac{1}{4}d$$

или

$$N = \frac{1}{4} (d - 6r);$$

поэтому

$$F = \frac{6r^2}{6r-d} = -F' \dots \dots \dots (\alpha)$$

$$\Psi = \frac{2dr}{6r-d} = -\Psi'$$

Ур. (α) показывает, что

- 1) если $6r - d > 0$, то F положит. и система *собирающая*,
- 2) если $6r - d = 0$, то $F = \infty$ и система *телескопическая*,
- 3) если $6r - d < 0$, то $F < 0$ и система *разъединяющая*.

Обыкновенно на практикѣ мы встречаемся со случаемъ 1).

Въ этомъ случаѣ

$$\Psi > 0 \text{ и } \Psi' < 0,$$

т. е. H лежитъ вправо отъ S_1 , а H' на такомъ же разстояніи влево отъ S_2 .

Такъ какъ

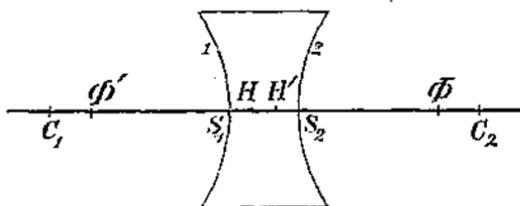
$$\Psi = -\Psi' = \frac{2dr}{6r-d} = \frac{2d}{6 - \frac{d}{r}},$$

то при $\frac{d}{r}$ весьма маломъ можемъ принять:

$$\Psi = -\Psi' = \frac{2d}{6} = \frac{d}{3}$$

т. е. тогда H и H' отстоятъ отъ соответствующихъ вершинъ S_1 и S_2 почти на $\frac{1}{3}d$.

б) Двояковогнутая линза. Въ этомъ случаѣ (фиг. 40) r_1 отрицательное, а r_2 положительное. По прежнему принимаемъ $n = \frac{3}{2}$ и считаемъ абсолютныя величины радиусовъ r_1 и r_2 одинаковыми.



фиг. 40.

Обозначимъ абсолютную величину каждаго радиуса черезъ r ; тогда будемъ имѣть:

$$r = -r_1 = r_2$$

и въ такомъ случаѣ

$$N = \frac{3}{2}r + \frac{d}{4},$$

$$F = -\frac{3}{2} \frac{r^2}{N} = -F'$$

$$\text{и } \Psi = \frac{dr}{2N} = -\Psi';$$

поэтому

$$F = -\frac{6r^2}{6r+d} = -F'$$

$$\text{и } \Psi = \frac{2dr}{6r+d} = -\Psi'$$

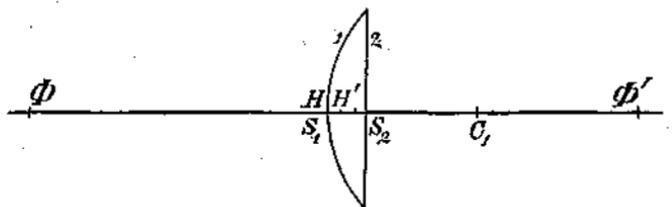
Предпоследнее уравненіе показываетъ, что F отрицательное т. е. двояковогнутая линза представляетъ *разсывающую* систему. Последнее уравненіе показываетъ, что H лежитъ вправо отъ S_1 , а H' на такомъ же разстояніи влево отъ S_2 . Это разстояніе можно представить такъ:

$$\frac{2dr}{6r+d} = \frac{2d}{6 + \frac{d}{r}}.$$

Въ случаѣ, когда d въ сравненіи съ r ничтожно, можемъ принять въ знаменателѣ членъ $\frac{d}{r}$ за нуль и тогда

$$\Psi = -\Psi' = \frac{d}{3}.$$

в) Плосковыпуклая линза. Сначала рассмотримъ случай, какъ на чертежѣ (фиг. 41).



фиг. 41.

Въ этомъ случаѣ r_1 положительное и $r_2 = \infty$.

Изъ ур. (60) слѣдуетъ, что

$$\frac{N}{r_2} = (n-1) \left[\left(1 - \frac{r_1}{r_2} \right) n - \frac{d(1-n)}{r_2} \right],$$

что при $r_2 = \infty$ и $n = \frac{3}{2}$ даетъ:

$$\frac{N}{r_2} = \frac{3}{4}.$$

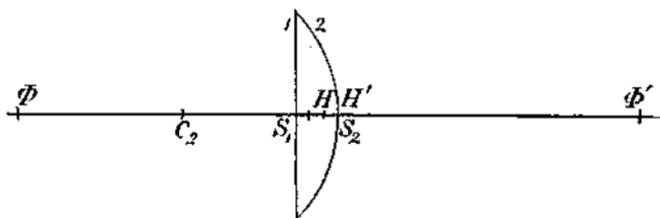
На основаніи тѣхъ же ур. (60) имѣемъ:

$$F = -F' = \frac{nr_1 r_2}{N} = \left(\frac{nr_1}{\frac{N}{r_2}} \right)_{\text{при } r_2 = \infty} = \frac{3r_1}{2} \cdot \frac{4}{3} = 2r_1.$$

$$\Psi = \left(\frac{\frac{dr_1}{r_2} (1-n)}{\frac{N}{r_2}} \right)_{\text{при } r_2 = \infty} = 0; \quad \Psi' = \left(\frac{\frac{d(1-n)}{N}}{\frac{r_2}{r_2}} \right)_{\text{при } r_2 = \infty} = -\frac{2}{3} d.$$

Такимъ образомъ F положительное, H совпадаетъ съ вершиною S_1 , а H' отстоитъ отъ S_2 на разстояніи $\frac{2}{3}d$ влево.

Разсмотримъ еще случай, какъ на чертежѣ фиг. (42)



фиг. 42.

Въ этомъ случаѣ $r_1 = \infty$ и r_2 отрицательное.

На основаніи ур. (60) имѣемъ:

$$\frac{N}{r_1} = (n-1) \left[\left(\frac{r_2}{r_1} - 1 \right) n - \frac{d(1-n)}{r_1} \right].$$

что при $r_1 = \infty$ и $n = \frac{3}{2}$ даетъ: $\frac{N}{r_1} = -\frac{3}{4}$.

Далѣе, на основаніи тѣхъ же ур (60) имѣемъ:

$$F = -F' = \frac{nr_1 r_2}{N} = \left(\frac{nr_2}{\frac{N}{r_1}} \right)_{\text{при } r_1 = \infty} = -2r_2,$$

$$\Psi = \left(\frac{\frac{d(1-n)}{N}}{\frac{r_1}{r_1}} \right)_{\text{при } r_1 = \infty} = \frac{2}{3} d$$

$$\text{и } \Psi' = \left(\frac{d \frac{r_2}{r_1} (1-n)}{N} \right)_{\text{при } r_1 = \infty} = 0.$$

Такимъ образомъ F положительное, H находится вправо отъ S_1 на разстояніи $\frac{2}{3} d$, H' совпадаетъ съ S_2 .

Подобнымъ образомъ можно было бы разсмотрѣть и остальные случаи линзъ.

§ 31. **Идеальная линза.** Идеальными линзами, строго говоря, называются линзы, которыхъ толщина $d=0$.

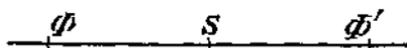
Хотя такихъ линзъ на практикѣ не существуетъ, но тѣмъ не менѣе намъ важно знать, къ какимъ предѣламъ стремятся формулы (60), если толщина стеколъ станетъ дѣлаться все меньше и меньше.

Предположимъ въ форм. (60) $d=0$; тогда получимъ формулы для идеальныхъ линзъ:

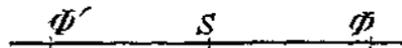
$$\left. \begin{aligned} F &= -\frac{n_1 r_2}{N} = -F' \\ \gamma &= -\frac{n_1^2}{N}; \quad \gamma' = \frac{n_2^2}{N} \\ \Psi &= \Psi' = 0 \\ N &= (n-1) n (r_2 - r_1) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (62)$$

Уравненія $\Psi = \Psi' = 0$ показываютъ, что точки H и H' совпадаютъ съ общою вершиною обѣихъ сферическихъ поверхностей идеальной линзы; поэтому идеальная линза опредѣляется положеніемъ трехъ только точекъ Φ , S и Φ' , гдѣ подъ S будемъ понимать общую вершину обѣихъ поверхностей идеальной линзы.

Такъ какъ F и F' всегда обратныхъ знаковъ, то для идеальныхъ линзъ могутъ представиться два случая, отличающіеся другъ отъ друга расположеніемъ точекъ Φ , S и Φ' , именно эти точки могутъ располагаться въ такомъ порядкѣ, какъ на фиг. 43, или какъ



фиг. 43.



фиг. 44.

на фиг. 44. Въ первомъ случаѣ система *собирающая*, а въ послѣднемъ—*разсѣивающая*.

На основаніи перваго и послѣдняго изъ уравненій (62) можемъ написать:

$$F = \frac{r_1 r_2 n}{(n-1)(r_2 - r_1) n}$$

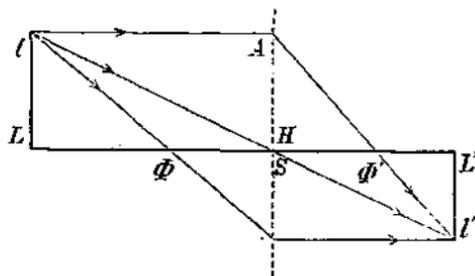
откуда получимъ:

$$\frac{1}{F'} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \dots \dots \dots (63)$$

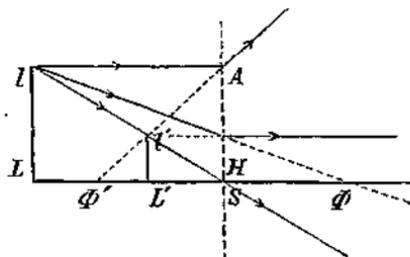
Изъ последней формулы видно, что F' будетъ положительнымъ или отрицательнымъ, смотря потому, будетъ ли разность $\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}$ положительною или отрицательною.

Формулами (62) и (63) мы будемъ пользоваться въ тѣхъ случаяхъ, когда толщина линзы d въ сравненіи съ длиною радиусовъ r_1 и r_2 настолько ничтожна, что безъ ощутительной погрѣшности можно принять $d=0$.

§ 32. Черченіе изображеній, образуемыхъ идеальною линзою, производится, какъ указано въ § 23 съ тѣмъ лишь упрощеніемъ, что въ случаѣ идеальной линзы обѣ узловые и обѣ главныя точки ея совпадаютъ съ общою вершиною S обѣихъ поверхностей линзы и тогда эта точка называется иногда *оптическимъ центромъ* линзы. Фигура 45 представляетъ случай собирающей линзы, а фигура 46—случай



фиг. 45.



фиг. 46.

чай разсѣивающей линзы. Въ обоихъ случаяхъ идеальная линза замѣнена на чертежѣ пунктирною линіею AH .

Прямая, проходящая черезъ оптическій центръ линзы и непроходящая черезъ центры сферическихъ поверхностей линзы, называется *побочною осью*. Нетрудно видѣть, что точка, лежащая на побочной оси, даетъ изображение на той же оси.

§ 33. Система, составленная изъ двухъ линзъ. Предполагая, что на чертежѣ (фиг. 32)—§ 24 S_1 и S_2 суть линзы и замѣчая, что для нихъ можемъ принять:

$$F_1' = -F_1, \text{ и } F_2' = -F_2,$$

мы получимъ для сложной системы, состоящей изъ двухъ линзъ, такіа формулы:

$$\left. \begin{aligned} F &= -\frac{F_1 F_2}{\Delta} = -F' \\ \underline{v} &= -\frac{F_1^2}{\Delta}, \quad \underline{v}' = -\frac{F_2^2}{\Delta} \\ \Delta &= -F_1 - F_2 + D \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (64)$$

Изъ первой и послѣдней форм. получаемъ равенство:

$$\frac{1}{F} = \frac{F_1 + F_2 - D}{F_1 F_2}$$

или

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} - \frac{D}{F_1 F_2} \dots \dots \dots (65)$$

Въ случаѣ идеальныхъ линзъ подѣ D будетъ пониматься расстояние между линзами. Если бы обѣ идеальныя линзы соприкасались, то формула (65) для такого случая перешла бы въ формулу:

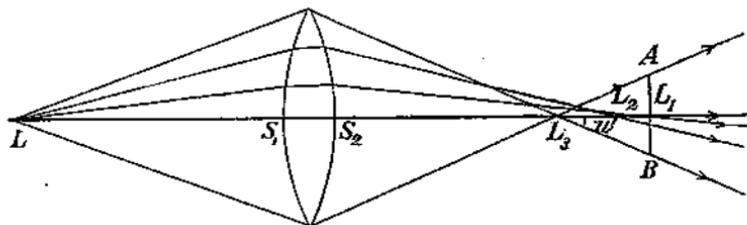
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} \dots \dots \dots (66)$$

Недостатки, являющіеся въ изображеніи, если не ограничиваться одними только центральными лучами.

§ 34. **Сферическая аберрація.** До сихъ поръ мы разсматривали центральные лучи, т. е. такіе, которые съ осью образуютъ весьма малые углы наклопенія.

Но существуютъ и такіе оптическіе приборы (напр. микроскопъ), въ которыхъ дѣйствуютъ и лучи съ большимъ сравнительно угломъ наклопенія u ; поэтому намъ нужно кое-что сказать о такихъ лучахъ.

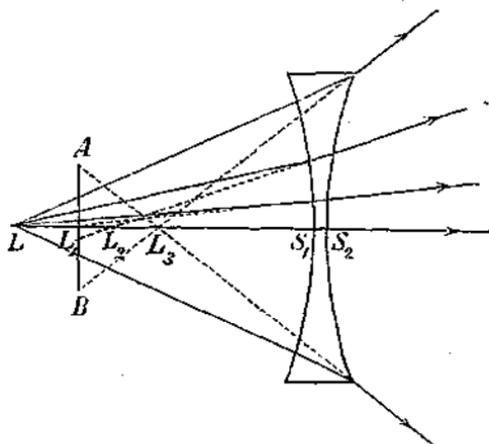
Изъ того, что было упомянуто въ § 9, мы заключаемъ, что если на собирательное сферич. стекло (фиг. 47) падаютъ лучи, исхо-



фиг. 47.

дящіе изъ точки L , лежащей на оси, то они по выходѣ изъ стекла не собираются все въ одной точкѣ, а проходятъ слѣдующее. Центральные лучи пересѣкаютъ ось въ нѣкоторой точкѣ, напр. въ L_1 , лучи же не центральные пересѣкаютъ ось въ точкахъ, рас-

положенныхъ влѣво отъ означенной точки L_1 , и чѣмъ ближе къ краю стекла падаетъ лучъ, тѣмъ ближе къ стеклу онъ пересѣкаетъ ось; поэтому крайніе лучи пересѣкаютъ ось въ нѣкоторой точкѣ L_3 , которая располагается ближе къ стеклу, чѣмъ какая либо изъ остальныхъ точекъ пересѣченія лучей съ осью.



фиг. 48.

Если бы взять во вниманіе разсѣивательное стекло (фиг. 48), то тоже самое наблюдалось бы и здѣсь, но съ тою только разницею, что L_3 располагалась бы вправо отъ L_1 , а не влѣво, какъ на фиг. 47. Последнее замѣчаніе намъ важно замѣтить. Мы видимъ, что въ то время, какъ первая линза (фиг. 47) стремится точку схождения крайнихъ лучей перемѣстить влѣво, вторая линза (фиг. 48) стремится передвинуть такую же точку вправо. Значитъ, аберраціи этихъ линзъ обратнаго характера и если аберрацію первой линзы (фиг. 47) станемъ считать положительною, то аберрацію второй линзы (фиг. 48) необходимо придется считать отрицательною. Мы такъ и будемъ дѣлать, т. е. аберрацію собирательной линзы будемъ считать положительною, а разсѣивательной—отрицательною.

Явленіе сферической аберраціи происходитъ оттого, что сферическія стекла (да и вообще простыя линзы), уже по самой своей природѣ, обладаютъ свойствомъ преломлять лучи тѣмъ сильнѣе, чѣмъ послѣдніе ближе къ краю и усиленіе преломленія по мѣрѣ приближенія къ краю линзы возрастаетъ въ большей степени, чѣмъ въ какой нужно для того, чтобы всѣ лучи по выходѣ изъ линзы собирались въ одной точкѣ.

Хрусталикъ нашего глаза обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что по мѣрѣ углубленія въ середину его показатель преломленія растетъ. При такихъ условіяхъ края хрусталика сравнительно съ линзами изъ

однородного вещества должны слабѣе преломлять лучи. Это обстоятельство, можеть быть, способствуетъ устраненію сферической aberrаціи въ нашемъ глазу.

Замѣтимъ еще, что мы можемъ вычислить продольную сферическую aberrацію. Въ самомъ дѣлѣ, въ §§ 8 и 9 на численныхъ примѣрахъ мы показали, какъ вычисляется путь центрального и нецентрального лучей не только въ случаѣ одной преломляющей поверхности, но и цѣлой системы. По указаннымъ приемамъ мы можемъ вычислить разстояніе точекъ L_1 и L_3 (фиг. 47 и фиг. 48) отъ вершины S_2 , т. е. можемъ знать, какъ длину $L_1 S_2$, такъ и длину $L_3 S_2$, а потому можемъ вычислить и продольную сф. aberrацію, которой абсолютная величина представится такъ:

$$S_2 L_1 - S_2 L_3$$

Для численнаго примѣра, разсмотреннаго въ §§ 8 и 9, величина продольной aberrаціи представится такъ:

$$s_2' - a_2 = 605,47 \text{ mm.} - 595 \text{ mm.} = 10,47 \text{ mm.}$$

въ предположеніи, что лучъ, падающій на высотѣ $H = 50 \text{ mm.}$, есть крайній лучъ.

Зная продольную сф. aberrацію и уголъ наклоненія u' преломленнаго крайняго луча, нетрудно вычислить и поперечную сферическую aberrацію.

На основаніи чертежей (фиг. 47 и фиг. 48) имѣемъ:

$$L_1 A = L_1 B = L_1 L_3 \cdot \text{tg } L_1 L_3 B,$$

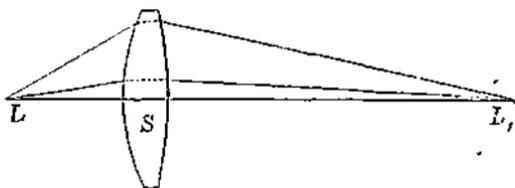
гдѣ $L_1 A$ или $L_1 B$ представляетъ абсолютную величину поперечной сферической aberrаціи.

Представимъ себѣ теперь систему, состоящую изъ собирательныхъ и разсѣивательныхъ стеколъ. Такъ какъ собирательныя стекла даютъ положительную aberrацію, а разсѣивательныя—даютъ aberrацію противоположнаго характера, т. е. отрицательную, то въ нашей системѣ можеть имѣть мѣсто одинъ изъ трехъ случаевъ:

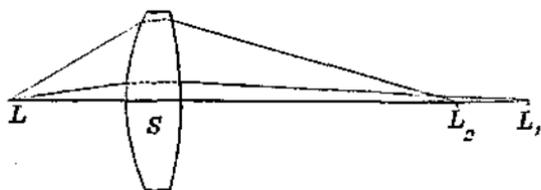
- а) aberrація равна нулю (фиг. I),
- б) aberrація положительная (фиг. II)
- и в) aberrація отрицательная (фиг. III).

Система, въ которой сферическая aberrація равна нулю, называется *сферически исправленною* (фиг. I). Если же въ системѣ отъ совокупнаго дѣйствія собирательныхъ и разсѣивательныхъ линзъ остается положительная aberrація, то система называется *сферически недоисправленною* и тогда, какъ показываетъ чертежъ (фиг. II), центральные лучи пересѣкаютъ ось въ точкѣ, расположенной вправо отъ точки, въ которой пересѣкаютъ ту же ось крайніе лучи. Если,

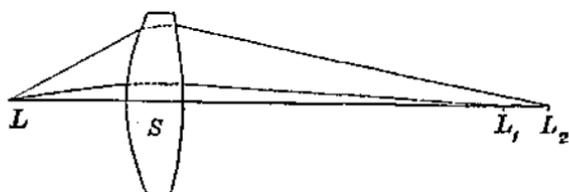
наконецъ, въ системѣ остается отрицательная аберрація, то система называется *сферически перисправленною*; тогда, какъ показывается чертежъ (фиг. III), центральные лучи пересекаютъ ось въ точкѣ, расположенной влѣво отъ точки, въ которой пересекаютъ ту же ось



фиг. I.



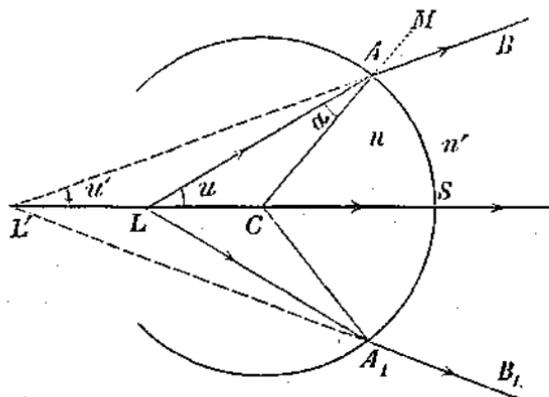
фиг. II.



фиг. III.

крайніе лучи. При этомъ имѣется въ виду, что свѣтъ идетъ слѣва направо.

Замѣчательно, что сферическая преломляющая поверхность имѣетъ сопряженныя точки, свободныя отъ сферической аберраціи.



фиг. 49.

Положимъ, что на чертежѣ (фиг. 49) ASA_1 представляетъ сферич. преломляющую поверхность, C —центръ, а $CA = r$ — радиусъ этой поверх. Показателя преломления лѣвой среды обозначимъ черезъ n , а правой — черезъ n' и пусть $n > n'$. На

продолженіи прямой CS влево отъ C отложимъ отръзокъ $LC = \frac{n'}{n} r$ и отръзокъ $L'C = \frac{n}{n'} r$. Вообразимъ, что въ L свѣтится точка, которая бросаетъ лучи на преломляющую поверхность ASA_1 . Возьмемъ во вниманіе любой изъ этихъ лучей, напр. лучъ LA . Чтобы опредѣлить его направленіе послѣ преломленія, стоить только соединить точку L' съ точкою паденія A прямою $L'A$ и продолжить эту прямую, какъ показано на чертежѣ, до некоторой точки B . Прямая AB и представитъ направленіе луча LA послѣ его преломленія. Чтобы это доказать, достаточно убѣдиться въ томъ, что $\angle BAM$ есть уголъ преломленія, соответствующій углу паденія LAC .

Треугольники ALC и $AL'C$ подобны, потому что имѣютъ общій уголъ ACL' и стороны, составляющія его, пропорціональны, т. е.

$$\frac{CL}{CA} = \frac{CA}{CL'}$$

Последняя пропорція написана на томъ основаніи, что

$$CL : CA = \frac{n'}{n} r : r = \frac{n'}{n}$$

и

$$CA : CL' = r : \frac{n}{n'} r = \frac{n'}{n},$$

откуда и слѣдуетъ, что

$$CL : CA = CA : CL'.$$

Изъ подобія тѣхъ же треугольниковъ слѣдуетъ, что

$$\angle AL'C = \angle LAC = \alpha = \text{углу паденія} \dots \dots \dots (\nu)$$

и

$$\angle ALC = \angle L'AC = \angle MAB \dots \dots \dots (\rho)$$

Изъ треугольника ACL' слѣдуетъ, что

$$\frac{\sin \angle AL'C}{\sin \angle CAL'} = \frac{CA}{CL'} = \frac{n'}{n}$$

или

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \angle CAL'} = \frac{n'}{n}.$$

Но для двухъ срединъ n и n' всегда имѣетъ мѣсто равенство

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n'}{n},$$

гдѣ β = углу преломленія, которому соответствуетъ уголъ паденія α .

Поэтому изъ послѣднихъ двухъ пропорцій заключаемъ, что

$$\angle \beta = \angle CAL' = \angle MAB,$$

что и требовалось доказать.

Такия же разсужденія можно произвести и по отношенію къ лучу LA , и ко всякому другому, падающему пзъ L на поверхность ASA_1 .

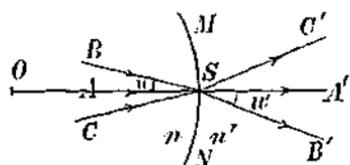
Что касается луча CS , то очевидно онъ такъ и поидетъ безъ преломленія по выходѣ изъ срединн n .

Такимъ образомъ видимъ, что всѣ лучи, падающіе на преломляющую поверхность ASA_1 изъ свѣтящейся точки L , послѣ преломленія направляются такъ, что будутъ казаться выходящими изъ точки L' , т. е. ихъ геометрическія продолженія пересѣкутся въ L' .

Значить, точки L и L' суть двѣ сопряженныя точки, вполнѣ свободныя отъ сферической абераціи.

Другая пара сопряженныхъ точекъ, свободныхъ отъ абераціи, совпадаетъ съ центромъ C ; потому что всѣ лучи, падающіе пзъ C на поверхность ASA_1 , не преломляются.

Замѣтимъ еще, что каждая точка преломляющей поверхности служитъ для себя самой и сопряженною точкою. Въ самомъ дѣлѣ, падающимъ лучамъ BS , AS и CS ,



фиг. 50.

(фиг. 50), сходящимся въ точкѣ S , соответствуютъ преломленные лучи SB' , SA' и SC' , сходящіеся въ той же точкѣ S на прелом. пов. MN . Значить, можемъ сказать, что въ каждой точкѣ прелом. поверхности, совпадаетъ пара сопряженныхъ точекъ, свободныхъ отъ

сферической абераціи и на линіи $L'S$ (фиг. 49) еще въ S будетъ пара совпадающихъ сопряженныхъ точекъ, свободныхъ отъ сферич. абераціи, а всего на линіи $L'S$ будетъ три пары сопряженныхъ точекъ, свободныхъ отъ сферич. абераціи: одна пара L и L' , другая пара—это пара точекъ, совпадающихъ въ C и третья пара—это пара точекъ, совпадающихъ въ S .

При устройствѣ объективовъ для микроскопа первая пара точекъ, т. е. точки L и L' (фиг. 49), играютъ весьма важную роль.

Нетрудно вывести еще одно замѣчательное свойство для каждой изъ трехъ паръ упомянутыхъ точекъ. Для этой цѣли обратимся къ черт. (фиг. 49) и назовемъ углы наклоненія двухъ произвольныхъ сопряженныхъ лучей LA и AB соответственно буквами α и α' . Мы имѣли въ этомъ параграфѣ пропорцію

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n'}{n}.$$

На основаніи ур. (v) и (p) нетрудно видѣть, что уг. $\alpha =$ уг. α' и уг. $\beta =$ уг. β' .

Поэтому эта пропорція переписывается такъ:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n'}{n} = \text{const.} \quad (67)$$

Что касается до другой пары точекъ, совпадающихъ съ центромъ C (фиг. 49), то для нихъ очевидно

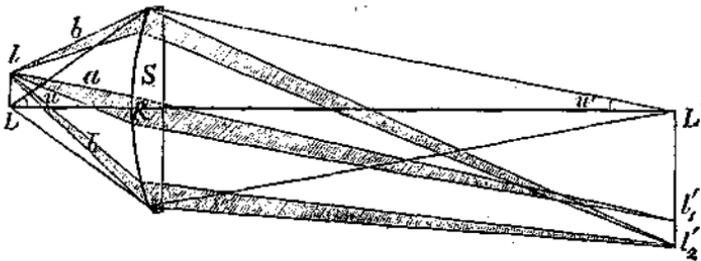
$$\frac{\sin u'}{\sin u} = 1 = \text{const.} ,$$

потому что для нихъ всегда $u = u'$. Также точно очевидно, что для точки S (фиг. 50) имѣетъ мѣсто пропорція:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n}{n'} = \text{const.} ,$$

такъ какъ для произвольнаго луча BS уг. $u =$ углу паденія, а уг. $u' =$ углу преломленія. Значитъ, оказывается, что для каждой изъ трехъ паръ точекъ, свободныхъ отъ сферич. aberrацин, отношеніе $\frac{\sin u'}{\sin u}$ есть величина *постоянная*, независящая отъ выбора сопряженныхъ лучей.

§ 35. **Изображеніе весьма малаго предмета въ случаѣ, когда на систему изъ каждой точки предмета падаетъ широкій коническій пучекъ лучей.** (Апланатическая система и апланатическія точки преломляющей сферич. поверхности). Случай, который мы имѣемъ сейчасъ разсматривать, имѣетъ мѣсто въ микроскопахъ, гдѣ отъ точекъ весьма малаго предмета падаютъ на поверхность объектива микроскопа, широкіе коническіе пучки лучей. Если мы говоримъ „широкій коническій пучекъ лучей“, то подъ этимъ понимаемъ, что лучи образуютъ конусъ съ большимъ угловымъ отверстіемъ, а подъ угловымъ отверстіемъ понимаемъ уголъ, получаемый въ осевомъ сѣченіи конуса плоскостью. Положимъ, что на чертежѣ (фиг. 51) S



фиг. 51.

изображаетъ нѣкоторую оптическую систему, а LL' изображаетъ весьма малую часть плоскости, перпендикулярной къ оси LL' . Отверстіе системы предполагается достаточно большимъ, а разстояніе LK

предполагается сравнительно малымъ, такъ что изъ каждой точки предмета lL на систему S падаетъ широкій коническій пучекъ лучей. Положимъ еще, что наша система S сферически исправлена относительно осевыхъ сопряженныхъ точекъ L и L' , т. е. всѣ лучи, выходящіе изъ точки L , по выходѣ изъ системы опять собираются въ точкѣ L' .

Опытъ показываетъ, что послѣднее условіе еще недостаточно, чтобы система давала отчетливое изображеніе предмета lL . Если система сферически исправлена относительно L и L' , то это только значитъ, что осевая точка L изобразится отчетливо въ L' , остальные же точки предмета lL изобразятся не вполне отчетливо. Чтобы уяснить себѣ причину этого явленія, разобьемъ мысленно поверхность



фиг. 52.

системы на концентрическія зоны (поясы) такъ, что если бы мы смотрѣли на переднюю поверхность системы, то на ней зоны представлялись бы менѣе болѣе, какъ на чертежѣ (фиг. 52). Разсмотримъ, какъ дѣйствуютъ пучки лучей, падающіе на различныя зоны поверхности системы изъ точки l , лежащей внѣ осп. Узкій пучекъ a (фиг. 51) такъ называемыхъ центральныхъ лучей, образующихъ (въслѣдствіе малости предмета lL) съ осью весьма малые углы наклопенія, по выходѣ изъ системы даетъ изображеніе точки l въ нѣкоторой точкѣ l_1' , положеніе которой опредѣлится по правиламъ, изложеннымъ нами въ предыдущихъ параграфахъ. Пучекъ лучей b , падающій на крайнюю зону, по выходѣ изъ системы даетъ изображеніе точки l въ нѣкоторой точкѣ l_2' , несовпадающей съ l_1' , а расположенной отъ L' дальше, чѣмъ l_1' . Подобное явленіе будетъ и съ другими точками весьма малаго предмета lL и въ то время, какъ средняя весьма малая часть K поверхности системы S , воспринимаемая на себя только центральные лучи, даетъ для предмета lL изображеніе $L'l_1'$, крайняя зона даетъ для того же предмета изображеніе гораздо болѣе большихъ размѣровъ, именно $l_2'L'$. Аналогично съ крайней зоной будутъ дѣйствовать остальные зоны съ тою только разницею, что чѣмъ ближе къ срединѣ K будетъ зона, тѣмъ меньшее она дастъ изображеніе, но самое малое изъ всѣхъ изображеній будетъ $L'l_1'$, производимое среднею частью K поверхности системы. Такъ какъ зонъ можно представить себѣ безчисленное множество, то система дастъ, собственно говоря, безчисленное множество изображеній предмета lL , которыя налягутъ другъ на друга; но такъ какъ они разной величины, то соответствующія ихъ точки не совпадутъ другъ съ другомъ, исключая тѣхъ точекъ, которыя представляютъ изображенія точки L и лежатъ на осп въ L' ; поэтому только L' представится отчетливо, а напр. точки, пред-

ставляющія изображенія точки l , расположатся въ промежуткѣ между l_1' и l_2' , несовпадая другъ съ другомъ, и для l не получится отчетливаго изображенія. Изъ сказаннаго видимъ, что причина неясности (неотчетливости) въ данномъ случаѣ заключается въ томъ, что различныя зоны даютъ различныя увеличенія предмета. Этотъ недостатокъ въ системѣ устраняется, если осевыя точки системы сферически исправлены и кромѣ того всѣ зоны даютъ одинаковое увеличеніе.

Для того, чтобы всѣ зоны давали одинаковое увеличеніе предмета Pl , необходимо и достаточно, чтобы для всякой пары сопряженныхъ лучей, изъ которыхъ одинъ проходитъ черезъ точку L , а другой черезъ точку L' , отношеніе $\frac{\sin u'}{\sin u}$ было постоянною величиною, равною $\frac{n}{n'\beta}$, т. е. чтобы имѣло мѣсто равенство:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n}{n'\beta} = \text{пост. вел. } *) \quad (68)$$

гдѣ u и u' соотвѣтственно обозначаютъ углы наклоненія двухъ сопряженныхъ лучей, а β — поперечное увеличеніе въ сопряженныхъ плоскостяхъ L и L' . Это правило называется *закономъ синусовъ*. Изъ ур. (68) непосредственно вытекаетъ такое равенство:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n}{n' \cdot \beta_0}$$

гдѣ β_0 выражаетъ поперечное увеличеніе для центральныхъ лучей.

Если система сферически исправлена для осевыхъ точекъ и всѣ зоны ея даютъ одинаковое увеличеніе, то она называется *апланатическою*.

Замѣчательно, что прежніе оптики готовили апланатическіе объективы для микроскоповъ, когда законъ синусовъ еще не былъ извѣстенъ. Эти оптики, желая получить рѣзкое изображеніе не только въ серединѣ но и по краямъ его, пробовали соединять разныя линзы пока наконецъ, такъ сказать, ошушью не дошли до такой комбинаціи, которая представляетъ апланатическую систему, удовлетворяющую закону синусовъ. Потому уже ученые теоретически стали доказывать необходимость соблюденія условія синусовъ для достиженія отчетливаго изображенія въ микроскопахъ.

*) Выводъ формулы (68) можно найти въ сочиненіи Чапскаго: *Theorie der optischen Instrumente*. v. Dr. S. Czapski. стр. 99, а также въ сочиненіи: A. Gleichen. *Lehrbuch der geometrischen Optik*. 1902.

Мы говорили, что сферическая преломляющая поверхность на каждой оси имѣетъ три пары сопряженныхъ точекъ, свободныхъ отъ сферической аберраціи. Но по доказанному въ концѣ предыдущаго параграфа для каждой пары этихъ точекъ отношеніе $\frac{\sin u'}{\sin u}$ постоянно; слѣдовательно въ этихъ точкахъ преломляющая поверхность является апланатической и поэтому означенныя точки называются *апланатическими*.

Нетрудно доказать, что для каждой пары означенныхъ точекъ выраженіе $\frac{\sin u'}{\sin u}$ дѣйствительно равняется $\frac{n}{n'\beta_0}$. Докажемъ это для точекъ L и L' (смот. фиг. 49). Въ параграфѣ 3 мы имѣли равенство:

$$\frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{s'}{s} \dots \dots \dots (7)$$

но для нашихъ точекъ L и L' очевидно:

$$LS = -s = r + \frac{n'}{n} r = \frac{n+n'}{n} r \quad (\text{гдѣ } r \text{ абс. в.)}$$

и

$$L'S = -s' = r + \frac{n}{n'} r = \frac{n+n'}{n'} r,$$

откуда имѣемъ:

$$\frac{s'}{s} = \frac{n}{n'}$$

и слѣдовательно

$$\frac{y'}{y} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{n}{n'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2;$$

поэтому

$$\beta_0 = \frac{y'}{y} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2;$$

слѣдовательно

$$\frac{n}{n'\beta_0} = \frac{n'}{n},$$

а въ предыдущемъ параграфѣ было показано, что для L и L' имѣетъ мѣсто равенство:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n'}{n}.$$

Значитъ, приходимъ къ заключенію, что

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n}{n'\beta_0}.$$

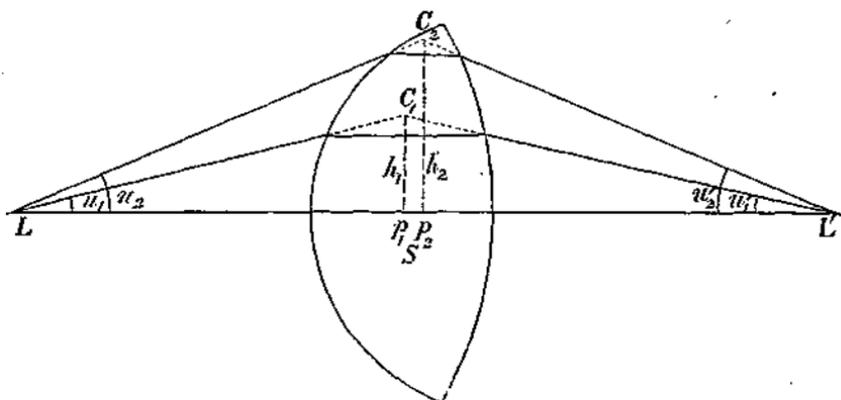
Тоже самое можно доказать и для остальныхъ паръ апланатическихъ точекъ, причемъ для второй пары точекъ, совпадающихъ

въ центръ, удобнѣе всего примѣнить ур. (7), а къ третьей парѣ точекъ, совпадающихъ въ вершинѣ S , удобно примѣнить формулу (23) — § 6, при чемъ въ послѣдней формулѣ надо принять $x = -f$ и $x' = -f'$.

Мы видимъ, что всякая прелом. сферическая поверхность представляетъ такую простѣйшую систему, которая въ нѣкоторыхъ точкахъ апланатическая, хотя фокусныя разстоянія для различныхъ зонъ этой системы совсѣмъ не одинаковы. Это замѣчаніе дѣлаемъ въ виду того, что часто смѣшиваютъ законъ синусовъ съ условіемъ равенства фокусныхъ разстояній для различныхъ зонъ системы. *)

Намъ ниже выяснится, для какой цѣли необходимо послѣднее условіе, т. е. равенство фокусныхъ разстояній для различныхъ зонъ системы.

Теперь рѣшимъ вопросъ, какъ выразится условіе синусовъ, если одна изъ сопряженныхъ точекъ находится въ безконечности. Пусть система S (фиг. 52 а) представляетъ систему, апланатическую для сопряженныхъ точекъ L и L' . Возьмемъ два произвольныхъ луча LC_1



фиг. 52 а.

и LC_2 , идущихъ изъ точки L . Имъ соответствуютъ два сопряженныхъ луча C_1L' и C_2L' . Такъ какъ по условію система S апланатическая для точекъ L и L' , то имѣетъ мѣсто равенство :

$$\frac{\sin u_1}{\sin u_1'} = \frac{\sin u_2}{\sin u_2'} = \text{пост. вел.}$$

Но изъ треугольниковъ LC_1L' и LC_2L' имѣемъ:

$$\frac{\sin u_1}{\sin u_1'} = \frac{C_1L'}{C_1L} \text{ и } \frac{\sin u_2}{\sin u_2'} = \frac{C_2L'}{C_2L};$$

*) Стр. 668 въ сочин. Lehrbuch der Physik und Meteorologie. Müller — Pouillet's. 1897.

поэтому условие синусовъ выразится такъ:

$$\frac{C_1 L'}{C_1 L} = \frac{C_2 L'}{C_2 L} = \text{пост. вел.},$$

откуда имѣемъ такое равенство:

$$C_2 L' = C_1 L' \cdot \frac{C_2 L}{C_1 L}.$$

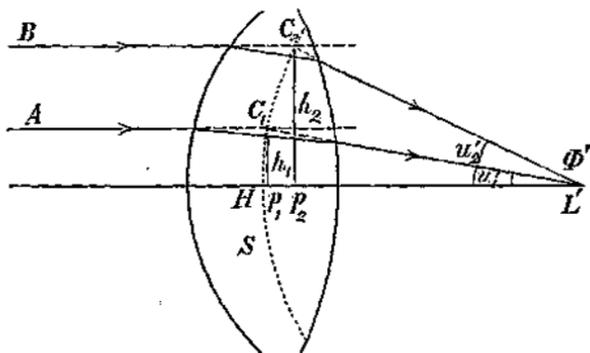
Предположимъ, что точка L удаляется отъ системы S , двигаясь по оси влѣво въ то время, какъ система S имѣется такъ, что постоянно сохраняется условіе синусовъ для новыхъ положеній точекъ L и L' . Докажемъ, что по мѣрѣ удаленія точки L въ безконечность, отношеніе $\frac{C_2 L}{C_1 L}$ стремится къ единицѣ. Дѣйствительно, какъ бы далеко точка L ни была, отрѣзокъ $C_2 L$ отличается отъ отрѣзка $C_1 L$ на конечную величину. Пусть $C_2 L = C_1 L + \alpha$, гдѣ α конечная величина. Раздѣляя обѣ части послѣдняго равенства на $C_1 L$, получимъ

$$\frac{C_2 L}{C_1 L} = 1 + \frac{\alpha}{C_1 L},$$

откуда заключаемъ, что при удаленіи точки L въ безконечность, т. е. при $C_1 L = \infty$, отношеніе $\frac{C_2 L}{C_1 L}$ дѣлается равнымъ единицѣ. Поэтому въ случаѣ, если точка L находится въ безконечности, условіе синусовъ выразится такъ:

$$C_1 L' = C_2 L' = \text{пост. вел.} \dots \dots \dots (68 a)$$

Чертежъ (фиг. 52 а) для случая, когда точка L въ безконечности, замѣняется чертежемъ (фиг. 52 б)



фиг. 52 б.

Замѣтимъ, что

$$C_1 L' = \frac{h_1}{\sin u_1'} \quad \text{и} \quad C_2 L' = \frac{h_2}{\sin u_2'}.$$

Если высота h_1 (фиг. 52 b) чрезвычайно мала, т. е. если лучь A центральный, то можно продолженіе C_1L' считать равнымъ $p_1L' = F'$. Поэтому выраженіе (68 a) замѣняется такимъ:

$$\frac{h_1}{\sin u_1'} = \frac{h_2}{\sin u_2'} = \text{пост. вел.} = F' \quad (68 b)$$

Это и есть некое условие для случая, когда точка L въ безконечности.

Величину $C_2L' = \frac{h_2}{\sin u_2'}$, соответствующую нецентральному лучу B (фиг. 52 b), принято считать фокуснымъ разстояніемъ для зоны на высотѣ h_2 и вообще величину $C_kL' = \frac{h_k}{\sin u_k'}$ считаютъ фокуснымъ разстояніемъ для зоны на высотѣ h_k , гдѣ k показываетъ порядокъ зоны. Точка C_k называется *главною* точкою зоны на высотѣ h_k .

Выраженіе (68 b) показываетъ, что для предмета, весьма удаленнаго влво отъ системы, послѣдняя апланатична, если вторья фокусныя разстоянія всѣхъ зонъ ея равны.

Предполагая, что система S (фиг. 52 b) свободна отъ сферической аберраціи, мы должны заключить, что при соблюденіи условия (68 b) главныя точки всѣхъ зонъ системы S лежатъ на окружности, описанной около L' , какъ центра, радиусомъ, равнымъ абсолютной величинѣ второго фокуснаго разстоянія F'' .

Подобныя разсужденія можно было бы примѣнить и къ случаю, когда точка L' удаляется въ безконечность.

Примѣчаніе. Мнѣ удалось доказать, что вообще если система апланатическая, то точки пересѣченія каждой пары сопряженныхъ меридіональныхъ лучей лежатъ на определенной одной и той же окружности.

Доказательство изложено при помощи аналитической геометріи. Ходъ разсужденій слѣдующій. Пусть на чертежѣ (фиг. 52 c) точка C представляетъ точку пересѣченія двухъ какихъ нибудь сопряженныхъ лучей: LC и $L'C$. Если система (которой мы не изображаемъ на чертежѣ) апланатична относительно точекъ L и L' (фиг. 52 c), то отношеніе $\frac{\sin u'}{\sin u}$ постоянно. Назовемъ это отношеніе черезъ $\frac{m}{n}$, такъ что $\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{m}{n}$.

*) При u_1' очень маломъ принимается $\sin u_1' = \text{tg } u_1'$.

Изъ треугольника LCL' слѣдуетъ, что

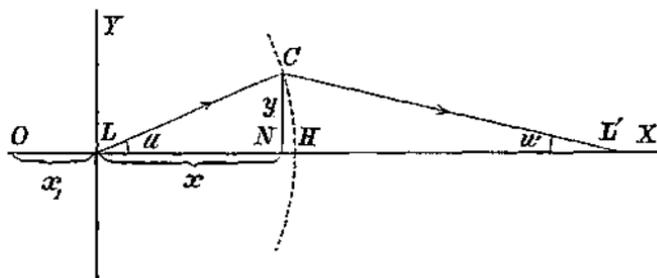
$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{LC}{L'C} ;$$

поэтому

$$\frac{LC}{L'C} = \frac{m}{n} .$$

Теперь задаемъ себѣ вопросъ: что представляетъ геометрическое мѣсто такихъ точекъ, какъ C , характерныхъ тѣмъ, что отношеніе разстояній ихъ отъ двухъ заданныхъ точекъ L и L' постоянно и равно $\frac{m}{n}$?

Чтобы рѣшить этотъ вопросъ, примемъ за ось абсциссъ линію LL' , а за ось ординатъ — перпендикуляръ къ ней, возста-



фиг. 52с.

вленный въ точкѣ L . Обозначимъ координаты точки C черезъ x и y . Изъ прямоугольныхъ треугольниковъ LCN и CNL' поочередно получаемъ:

$$LC = \sqrt{LN^2 + CN^2} \quad \text{и} \quad L'C = \sqrt{(NL')^2 + CN^2}$$

или

$$LC = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{и} \quad L'C = \sqrt{(NL')^2 + y^2} .$$

Пусть разстояніе между заданными точками L и L' равняется a , такъ что

$$LL' = a .$$

Тогда

$$NL' = LL' - LN = a - x ,$$

откуда имѣемъ, что

$$(NL')^2 = a^2 - 2ax + x^2$$

и

$$L'C = \sqrt{a^2 - 2ax + x^2 + y^2} .$$

Значить

$$\frac{LC}{L'C} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{a^2 - 2ax + x^2 + y^2}} = \frac{m}{n} ;$$

слѣдов.

$$\frac{x^2 + y^2}{a^2 - 2ax + x^2 + y^2} = \frac{m^2}{n^2},$$

откуда находимъ, что

$$(m^2 - n^2)x^2 + (m^2 - n^2)y^2 = 2m^2ax - m^2a^2;$$

поэтому

$$x^2 + y^2 - \frac{2m^2ax}{m^2 - n^2} = -\frac{m^2a^2}{m^2 - n^2}.$$

Прибавимъ къ обѣимъ частямъ послѣдняго равенства по

$$\frac{m^4a^2}{(m^2 - n^2)^2};$$

тогда послѣ нѣкоторыхъ упрощеній получимъ

$$\left(x - \frac{m^2a}{m^2 - n^2}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{mna}{m^2 - n^2}\right)^2,$$

а это и есть уравненіе круга, центръ котораго находится на

оси X-овъ на разстояніи $x_1 = \frac{m^2a}{m^2 - n^2}$ отъ начала координатъ L ;

радіусъ же его $r = \frac{mna}{m^2 - n^2}$.

Отсюда и слѣдуетъ, что *если система апланатическая, то точки пересѣченія соотвѣтственно сопряженныхъ лучей лежатъ на окружности.*

Для изслѣдованія полученныхъ результатовъ мы ради удобства введемъ особую единицу длины, именно мы примемъ, что $LH = m$ (единицамъ), гдѣ H — точка пересѣченія упомянутой окружности съ линією LL' .

Тогда

$$L'H = n,$$

потому что по условію

$$\frac{LC}{L'C} = \frac{LH}{L'H} = \dots = \frac{m}{n}.$$

Далѣе, $LL' = LH + HL' = m + n$; слѣдовательно

$$x_1 = \frac{m^2a}{m^2 - n^2} = \frac{m^2(m + n)}{m^2 - n^2} = \frac{m^2}{m - n}$$

и

$$r = \frac{mna}{m^2 - n^2} = \frac{mn(m + n)}{m^2 - n^2} = \frac{mn}{m - n}.$$

Окончательно получаемъ такіа формулы:

$$x_1 = \frac{m^2}{m-n} \quad \text{и} \quad r = \frac{mn}{m-n}.$$

1) Если $m < n$, то $x_1 < 0$, т. е. тогда центръ окружности располагается влѣво отъ начала координатъ L . Такой случай представленъ на нашемъ чертежѣ (фиг. 52c).

2) Если $m > n$, то $x_1 > 0$, т. е. тогда центръ окружности располагается вправо отъ начала координатъ.

3) Если $m = n$, то $x_1 = \infty$ и $r = \infty$, т. е. тогда окружность CH обращается въ прямую линію, которая очевидно проходитъ черезъ середину отрѣзка LL' .

Замѣтимъ еще, что если точка L' уйдетъ въ безконечность, тогда $n = \infty$, а L обратится въ фокусъ системы и $LH = m = F$, гдѣ F фокусное разстояніе системы. Съ другой стороны тогда

$$x_1 = \left(\frac{m^2}{m-n} \right)_{n=\infty} = 0$$

и

$$r = \frac{mn}{m-n} = \left(\frac{m}{\frac{m}{n} - 1} \right)_{n=\infty} = -m.$$

Отсюда заключаемъ, что если одна изъ двухъ сопряженныхъ апланатическихъ точекъ уйдетъ въ безконечность, то центръ нашей окружности совпадетъ съ другою точкою, которая тогда является фокусомъ системы, а радиусъ этой окружности по абс. вел. = фокусному разстоянію системы. Такой случай представленъ на чертежѣ (фиг. 52b).

Эти замѣчанія могутъ быть полезными для повѣрки апланатичности системы черченіемъ.

До сихъ поръ мы имѣли въ виду только лучи, лежащіе въ плоскости чертежа, которая предполагается проходящею черезъ ось системы. Такіе лучи называются меридіональными. При этомъ мы убѣдились, что если система апланатична, то точки пересѣченія сопряженныхъ лучей лежатъ на нѣкоторой окружности. Если же взять во вниманіе всѣ лучи, попадающіе въ систему, то не трудно сообразить, что точки пересѣченія сопряженныхъ лучей вообще лежатъ на нѣкоторой сферической поверхности, которой центръ и радиусъ опредѣляются, понятно, тѣми же формулами, которыя были выведены для окружности:

$$x_1 = \frac{m^2 a}{m^2 - n^2} \quad \text{и} \quad r = \frac{mna}{m^2 - n^2}.$$

Интересно, что

$$\frac{x_1}{r} = \frac{LO}{L'C} = \frac{LH}{L'H},$$

такъ какъ

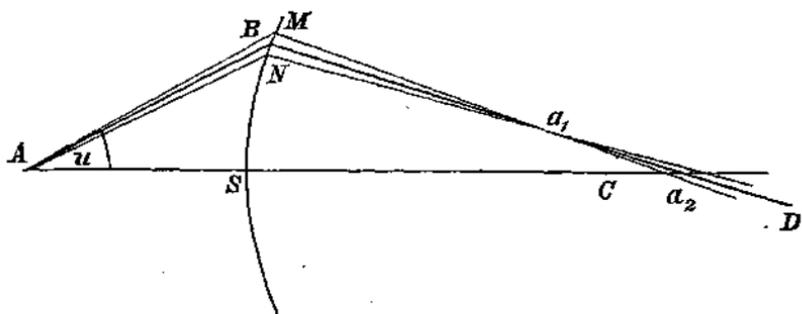
$$\frac{x_1}{r} = \frac{m^2 a}{m^2 - n^2} : \frac{mna}{m^2 - n^2} = \frac{m}{n}$$

и

$$\frac{LC}{L'C} = \frac{LH}{L'H} = \dots = \frac{m}{n}.$$

Замѣтимъ еще, что на чертежѣ (фиг. 52b) буква *H* обозначаетъ главную точку системы § 14, чего нельзя сказать по отношенію къ черт. (фиг. 52c), такъ какъ на послѣднемъ чертежѣ, какъ входящія, такъ и выходящія лучи не параллельны осн.

§ 36. **Астигматизмъ.** Говоря о весьма узкихъ пучкахъ лучей, будемъ отличать среди ихъ два рода пучковъ: *центральный* пучекъ и *наклонный*. Центральный пучекъ содержитъ центральные лучи, которые по малости угловъ наклоненія принимаются за нормальные (перпендикулярные) къ поверхности § 2. Наклонный же пучекъ состоитъ изъ лучей, которыхъ углы наклоненія значительны. Мы видѣли (§ 2), что если изъ некоторой точки падаетъ на поверхность



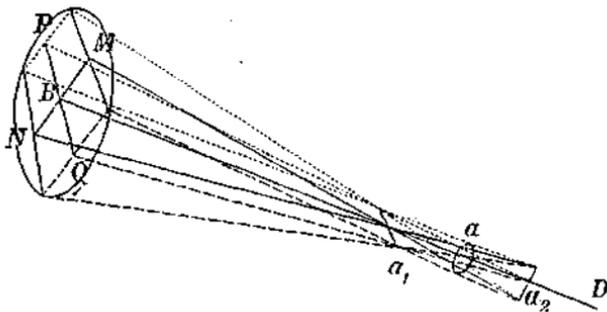
фиг. 53.

центральный пучекъ, то его лучи послѣ преломленія собираются опять въ одной точкѣ. Теперь посмотримъ, что происходитъ послѣ преломленія съ лучами весьма узкаго наклоннаго пучка. Пусть на сферич. преломляющую поверхность *SB* (фиг. 53.) падаетъ весьма узкій пучекъ лучей *AB* подѣ значительнымъ угломъ наклоненія *и*.

Подѣ угломъ *и* понимается уголъ наклоненія главнаго луча*)

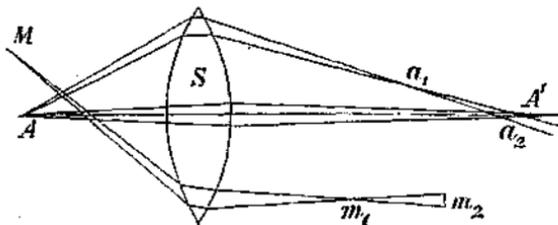
*) *Примѣчаніе.* Чтобы представить себѣ, что понимается подѣ главнымъ лучемъ свѣтового пучка, напр. *BA* (фиг. 53), предположимъ, что этотъ пучекъ матеріальный. Тогда геометрическое мѣсто центровъ тяжести всѣхъ поперечныхъ сѣченій пучка плоскостями, параллельными другъ другу, представляетъ прямую линію, которая и принимается за главный лучъ.

пучка. Лучи такого пучка послѣ преломленія не пересекаются въ одной точкѣ и происходитъ явленіе, которое называется *астигматизмомъ*. Слово „астигматизмъ“ значитъ одно и то же, что „отсутствіе точки“. Болѣе подробное изученіе этого явленія показываетъ, что лучи нашего наклоннаго пучка послѣ преломленія сходятся въ двухъ мѣстахъ, напр. въ a_1 и a_2 , но эти мѣста a_1 и a_2 не точки, а линіи. Если будемъ считать нашъ пучекъ AB *безконечно* узкимъ, то линіи a_1 и a_2 будутъ представлять *безконечно* короткія прямыя линіи, располагающіяся въ пространствѣ перпендикулярно другъ къ другу на *конечномъ* разстояніи другъ отъ друга, причемъ линія a_1 будетъ перпендикулярною къ плоскости чертежа, а линія a_2 будетъ лежать въ этой плоскости. Разстояніе $a_1 a_2$ служитъ мѣрою астигматизма для даннаго пучка.



фиг. 54.

Чертежъ (фиг. 54) до нѣкоторой степени объясняетъ намъ ходъ преломленныхъ лучей въ такомъ пучкѣ, который производитъ астигматизмъ. На этомъ чертежѣ ради ясности нѣкоторые элементы пучка черезчуръ преувеличены.



фиг. 55.

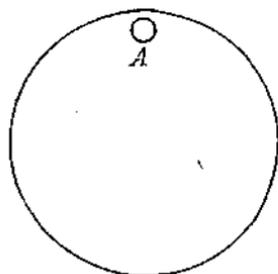
Мы говорили (§ 35), что преломляющая сверхъестественная поверхность имѣетъ алланатическія точки. Замѣтимъ, что означенныя точки свободны отъ астигматизма. Это слѣдуетъ непосредственно изъ самаго понятія объ этихъ точкахъ.

Взявъ вмѣсто одной преломл. поверхности двояковыпуклое стекло (фиг. 55), мы для него получимъ подобное же явленіе астигматизма, какъ и для одной прелом. сфер. поверхности. Особенно рельефно выступилъ бы астигматизмъ для точки M , лежащей вѣд оси $A'A'$; центральный же пучекъ ASA' по прежнему былъ-бы свободенъ отъ астигматизма.

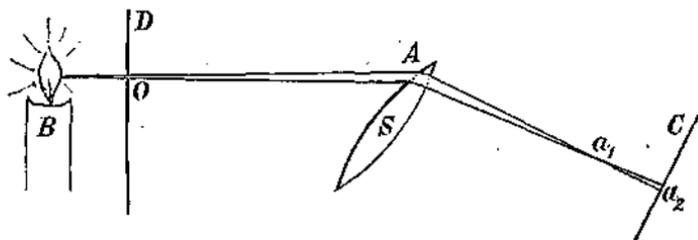
Общей формулы, выражающей условіе для отсутствія астигматизма при произвольномъ углѣ наклопенія u , пока не существуетъ.

Сказанное объ астигматизмѣ можно подтвердить эмпирически.

Опишу тотъ опытъ, который я самъ произвёлъ съ успѣхомъ. Было взято двояковыпуклое стекло менѣе болѣе такихъ размѣровъ, какъ показано на чертежѣ (фиг. 56) съ фокуснымъ разстояніемъ равнымъ приблизительно 5 сантим. Одна сторона этого стекла обклеивалась оловяннымъ листомъ, въ которомъ было сдѣлано отверстіе A . Затѣмъ, въ темной комнатѣ зажглась свѣча и въ разстояніи, равномъ приблизительно двумъ саженимъ отъ этой свѣчи, помѣщался бѣлый экранъ. Передъ экраномъ весьма недалеко отъ него помѣщалось упомянутое двояковыпуклое стекло въ наклонномъ положеніи. Придвигая экранъ къ стеклу или отодвигая отъ него, легко можно было получить изображеніе каждой изъ двухъ линій. При нѣкоторомъ положеніи стекла



фиг. 56.

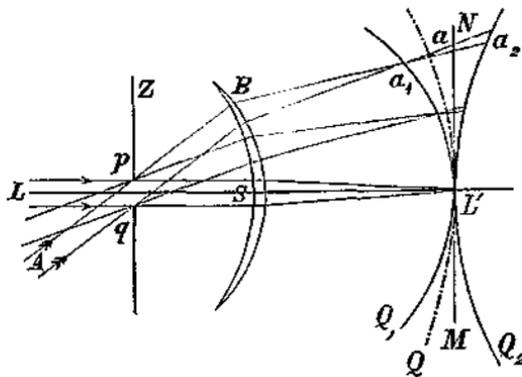


фиг. 57.

на экранѣ получалась вертикальная линія. По мѣрѣ приближенія экрана къ стеклу вертикальная линія постепенно укорачивалась и обращалась въ свѣтлый кружочекъ; при дальнѣйшемъ приближеніи экрана къ стеклу свѣтлый кружочекъ удлинялся и переходилъ въ свѣтлую линію, но уже расположенную горизонтально. Подобное явленіе астигматизма можно наблюдать, помѣщая экранъ C (фиг. 57) на близкомъ разстояніи отъ свѣчи B , напр. на разстояніи одного фута отъ нея; но въ такомъ случаѣ нужно широкое пламя свѣчи закрыть картономъ D , въ которомъ противъ пламени должно быть проколото

небольшое отверстие O (диаметром въ 2 mm). Черезъ такое отверстие на экранѣ C получается блѣдное обратное изображеніе пламени свѣчи. Противъ этого слабого изображенія передъ экраномъ помещаемъ въ сильно наклонномъ положеніи собирательное стекло S , какъ показано на черт. (фиг. 57). Передвигая экранъ то вправо, то влѣво, можно получить такіе же результаты, какъ и въ первомъ случаѣ, хотя линіи выходятъ не такъ рѣзкими. Само собою разумѣется, что эти опыты производятся въ помещеніи, защищенномъ отъ посторонняго свѣта. Можно производить опытъ и при дневномъ свѣтѣ, но въ такомъ случаѣ вмѣсто свѣчи слѣдуетъ воспользоваться непосредственными лучами солнца. Опытъ показываетъ, что одна изъ линій изображается отчетливѣе другой. Кстати замѣтимъ, что сдѣлавъ въ оловяномъ листѣ, покрывающемъ одну изъ поверхностей линзы S , два или нѣсколько малыхъ отверстій, можно изучать ходъ лучей въ нѣсколькихъ пучкахъ въ одно время*).

§ 37. Происхожденіе изображенія обширнаго предмета при помощи весьма узкаго пучка лучей и являющіеся при этомъ недостатки: астигматизмъ, искривленіе плоскости изображенія и отсутствіе въ изображеніи подобія предмету (искривленіе прямыхъ линій). Разсмотримъ случай, который иногда имѣетъ мѣсто при фотографированіи и именно предположимъ, что на значительномъ разстояніи отъ



фиг. 58.

системы S (фиг. 58) находится обширный предметъ, не показанный на чертежѣ, но предполагается, что онъ расположенъ влѣво отъ системы S въ плоскости, перпендикулярной къ оси системы LL' . До-

*) Довольно обстоятельное изложеніе теоріи астигматизма можно найти въ сочиненіи Чапскаго: *Theorie der optischen Instrumente*. 1893. Dr. S. Czapski; а еще лучше сочинен.: A. Gleichen. *Lehrbuch der geometrischen Optik*. 1902.

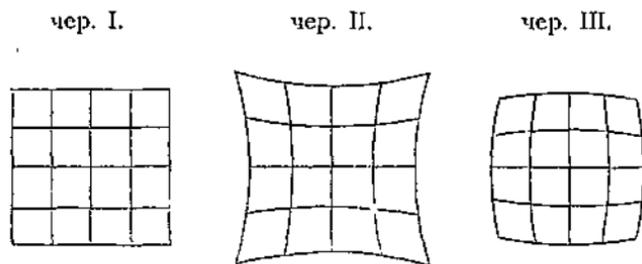
пустимъ еще, что передъ системою S находится непрозрачная ширма Z съ весьма малымъ отверстіемъ pq , пропускающимъ изъ каждой точки предмета на поверхность системы S весьма узкій пучекъ лучей. Въ виду того, что по предположенію разстояніе предмета отъ системы громадно, лучи каждаго падающаго на систему пучка изображены на чертежѣ параллельными другъ другу. Возьмемъ какой нибудь изъ этихъ пучковъ, напр. AB . Такъ какъ онъ наклонный по отношенію къ системѣ S , то согласно сказанному въ предыдущ. параграфѣ его лучи послѣ преломленія произведутъ астигматизмъ, т. е. выѣсто точки дадутъ двѣ весьма короткія линіи a_1 и a_2 . Если бы пучокъ AB сталъ постепенно наклоняться къ оси LL' , стремясь совпасть съ центральнымъ пучкомъ LL' , то линіи a_1 и a_2 стали бы приближаться къ оси LL' и въ тоже время разстояніе между ними уменьшалось бы. Вообще всѣ линіи перваго рода a_1 , соответствующія всевозможнымъ точкамъ предмета, располагаются на пѣкоторой кривой поверхности Q_1 , а всѣ линіи втораго рода a_2 располагаются на другой кривой поверхности Q_2 , при чемъ эти двѣ поверхности касаются въ точкѣ L' , представляющей изображеніе точки L . Каждый астигматическій пучекъ лучей, доставляющій линіи a_1 и a_2 , обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что между a_1 и a_2 находится самая узкая часть пучка, которая въ поперечномъ сѣченіи на экранѣ представляла бы пѣкоторое весьма малое свѣтлое пятно a . Это-то пятно естественнѣе всего принимать за изображеніе точки A . Всевозможныя пятна a , соответствующія различнымъ точкамъ плоскаго предмета, лежатъ на пѣкоторой кривой поверхности Q , проходящей черезъ L' . Если иногда невозможно устранить астигматизма, то полезно по крайней мѣрѣ ослабить его. Для этой цѣли нужно стараться составить систему такъ, чтобы упомянутыя пятна a по возможности были меньше и походили по малости своей на точки, иначе не получимъ отчетливаго изображенія по всему его полю.

Но астигматизмъ можетъ быть устраненъ или по крайней мѣрѣ можетъ быть сдѣланъ незамѣтнымъ и въ то же время можетъ остаться другой недостатокъ, именно изображеніе плоскаго обширнаго предмета можетъ не лежать на плоскости, а на пѣкоторой кривой поверхности, хотя само изображеніе можетъ быть отчетливымъ вслѣдствіе устраненія астигматизма. Этотъ недостатокъ будемъ называть *искривленіемъ плоскости изображенія*. Часто является необходимость въ изготовленіи такой системы, которая была бы свободна отъ послѣдняго недостатка. Въ такомъ случаѣ иногда поступаютъ такъ, что стремятся упомянутыя пятна a въ одно время уменьшить и передвинуть по возможности на плоскость MN , проходящую черезъ точку L' и перпендикулярную къ оси LL' . Опытъ показывааетъ, что

помѣщая передъ менiscoмъ S (фиг. 58) діафрагму *) Z на опредѣленномъ разстояніи отъ него, мы можемъ достигнуть того, что упомянутыя пятнышки a наклонныхъ пучковъ расположатся почти на плоскости MN , а при достаточно маломъ отверстіи діафрагмы пятнышки будутъ очень малыми; слѣдовательно въ данномъ случаѣ діафрагмою можно ослабить оба недостатка: астигматизмъ и искривленіе плоскости изображенія.

Объ устраненіи двухъ недостатковъ: астигматизма и искривленія плоскости изображенія, будемъ еще говорить въ статьѣ о фотограф. объективахъ § 55.

Познакомимся теперь съ ортоскопическою системою. На черте-

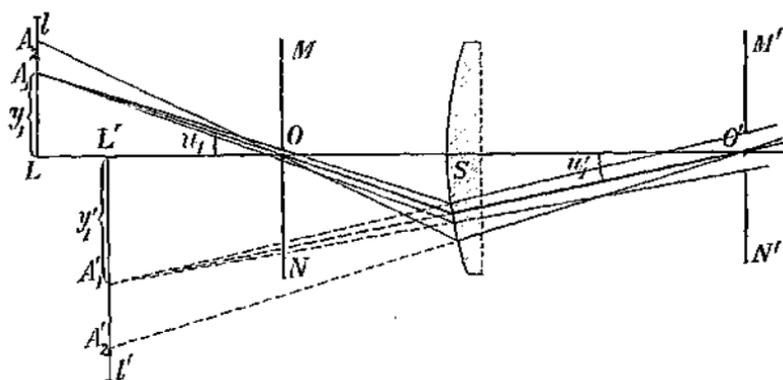


фиг. 59.

жѣ I (фиг. 59) изображена сѣтка, представляющая рядъ параллельныхъ линій, пересѣкающихся подъ прямымъ угломъ другимъ рядомъ параллельныхъ линій. Если оптическая система такова, что она не даетъ одинаковаго увеличенія для различныхъ частей обширнаго предмета, то изображеніе, произведенное такою системою, не можетъ быть похожимъ на предметъ. При этомъ, если по мѣрѣ приближенія къ краю предмета увеличеніе возрастаетъ, то упомянутая сѣтка (чер. I) изобразится такою системою такъ, какъ показано на чертежѣ II. Если же по мѣрѣ приближенія къ краю предмета увеличеніе уменьшается, то та же сѣтка (чер. I) изобразится такъ, какъ показано на чертежѣ III. Но если система даетъ для различныхъ частей предмета одинаковое увеличеніе, то такая система производитъ изображеніе, подобное предмету и сѣтка (чер. I) изобразится при помощи такой системы безъ всякаго искривленія прямыхъ. Система, дающая изображеніе, подобное предмету (безъ искривленія прямыхъ), называется *ортоскопическою*. Условіе для ортоскопичности системы легко можно выразить алгебраическою формулою. Мы рассмотримъ такой случай, который довольно часто имѣетъ мѣсто въ оптическихъ инструментахъ, именно мы предположимъ, что главные лучи всѣхъ

*) Непрозрачный кружокъ съ отверстіемъ по серединѣ.

узких конических пучков света, выходящих из различных точек плоского предмета lL (фиг. 60), пересекают ось системы S в одной и той же точке, напр. O , равно как и главные лучи всех конических пучков, выходящих из различных точек изображения $l'L'$, пересекают ось в одной и той же точке, напр. O' .



фиг. 60.

На чертежѣ (фиг. 60) MN и $M'N'$ собственно представляютъ ничто иное, какъ диафрагмы системы съ малыми отверстиями O и O' . Назовемъ расстояние предмета lL отъ точки O буквою d , а расстояние изображенія $l'L'$ отъ точки O' — буквою d' , такъ что будемъ имѣть:

$$OL = d \text{ и } O'L' = d'.$$

Пусть A_1 представлять произвольную точку предмета, а A_1' — изображение ея. Изъ этихъ точекъ по сдѣланному условію выходятъ коническіе свѣтовые пучки, главные лучи которыхъ A_1O и $A_1'O'$ образуютъ съ осью соответственные углы наклоненія u_1 и u_1' . На основаніи чертежа имеемъ:

$$A_1L = LO \operatorname{tg} A_1OL \text{ и } A_1'L' = O'L' \operatorname{tg} A_1'O'L'$$

или

$$y_1 = d \operatorname{tg} u_1 \text{ и } y_1' = d' \operatorname{tg} u_1'.$$

Взявъ вмѣсто A_1 и A_1' другую пару сопряженныхъ точекъ A_2 и A_2' , мы для нихъ такъ же точно получимъ уравненія:

$$y_2 = d \operatorname{tg} u_2 \text{ и } y_2' = d' \operatorname{tg} u_2',$$

Чтобы система давала для разныхъ частей предмета одно и то же увеличеніе, необходимо условіе:

$$\frac{y_1'}{y_1} = \frac{y_2'}{y_2} = \text{и т. д.}$$

Последнее выражение на основании предыдущих равенств замѣняется такимъ:

$$\frac{\operatorname{tg} u_1'}{\operatorname{tg} u_1} = \frac{\operatorname{tg} u_2'}{\operatorname{tg} u_2} = \text{и т. д.} = \frac{\operatorname{tg} u_0'}{\operatorname{tg} u_0},$$

гдѣ подѣ $\frac{\operatorname{tg} u_0'}{\operatorname{tg} u_0}$ понимается угловое увеличеніе A_0 въ точкахъ O и O' для центральныхъ лучей. Но на основаніи ур. (43) и ур. (45) имѣемъ:

$$A_0 = \frac{\operatorname{tg} u_0'}{\operatorname{tg} u_0} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\beta_0},$$

гдѣ подѣ β_0 понимается поперечное увеличеніе въ точкахъ O и O' для центр. лучей; поэтому условіе для того, чтобы система была ортоскопическою, окончательно выразится такъ:

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{1}{\beta_0} = \text{const.} \quad (69)$$

для всякой пары сопряженныхъ точекъ A и A' .

Если это условіе дѣйствительно имѣетъ мѣсто въ системѣ, то точки O и O' называются *ортоскопическими точками* системы.

Очевидно, что ортоскопическія точки не могутъ быть въ одно время и апланатическими, такъ какъ вообще $\frac{\sin u'}{\sin u}$ не равно $\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u}$.

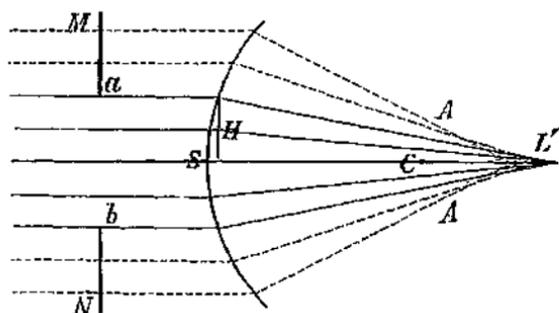
Только для центральныхъ лучей возможно допустить $\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u}$.

§ 38. **Нѣкоторыя замѣчанія о системѣ, дающей изображеніе обширнаго предмета при помощи широкаго пучка.** Недостатокъ—„кома“. Въ параграфѣ 35 говорилось о системѣ, дающей изображеніе весьма малаго предмета при помощи широкаго пучка, а въ параграфѣ 37 говорилось о системѣ, дающей изображеніе обширнаго предмета при помощи весьма узкаго пучка лучей. Теперь упомянемъ еще о системѣ, которой назначеніе производить изображеніе обширнаго предмета при помощи обширнаго пучка лучей. Къ такимъ системамъ принадлежатъ фотографическіе объективы.

При устройствѣ системъ, которыхъ назначеніе производить изображеніе обширнаго предмета помощью обширнаго свѣтового пучка, приходится бороться съ недостаткомъ „кома“. Въ параграфѣ 9 мы видѣли, что если на систему падаетъ широкій пучекъ лучей, параллельныхъ оси системы, то послѣ преломленія собираются въ одной точкѣ только тѣ лучи, которые падаютъ на поверхность системы на незначительномъ разстояніи отъ оси системы, а остальные лучи послѣ преломленія образуютъ каустическую поверхность, которая въ свѣче-

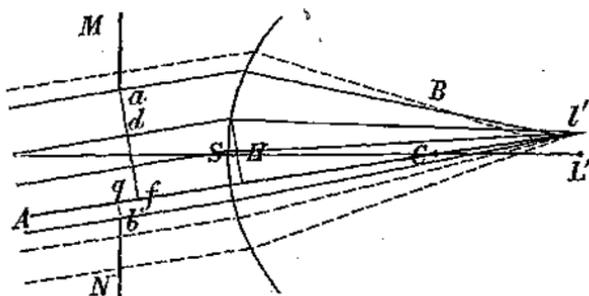
лин съ плоскостью чертежа (фиг. 15) представляет каустическую линию F_1D .

Подобнымъ образомъ, если на сферич. прел. поверхность S (фиг. 61), которой центръ въ C , падаетъ пучекъ лучей, параллельныхъ оси SC , проходящей черезъ середину отверстія диафрагмы MN , то послѣ преломленія только тѣ изъ нихъ собираются въ пѣкоторой точкѣ L' на оси SC , которые падаютъ на поверхность S на незначительномъ разстоянн отъ этой оси, напр. на разстоянн не превышающемъ H . Всѣ же остальные, содержащяся въ плоскости чертежа, послѣ преломленія образуютъ каустическую линію AL' . Мы предполагаемъ, что диафрагма MN , перпендикулярная оси SC , пропускаетъ черезъ свое отверстіе ab только тѣ лучи, которые послѣ преломленія собираются въ одной точкѣ L' , а лучей, производящихъ каустическую кривую, не пропускаетъ. Послѣдніе лучи изображены на чертежѣ пунктирными линіями. Далѣе, мы желаемъ разслѣдовать, что произойдетъ послѣ преломленія съ параллельными и содержащимися въ плоскости чертежа лучами наклоннаго пучка, падающаго на ту же поверхность при той же диафрагмѣ. Для большей ясности наклонный пучекъ изображенъ на отдѣльномъ



фиг. 61.

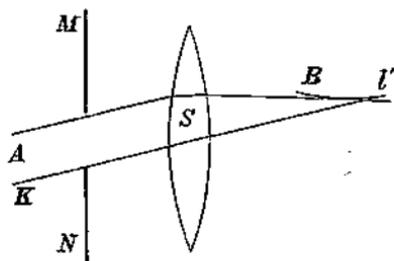
чертежѣ изображены въ одной точкѣ L' , а лучей, производящихъ каустическую кривую, не пропускаетъ. Послѣдніе лучи изображены на чертежѣ пунктирными линіями. Далѣе, мы желаемъ разслѣдовать, что произойдетъ послѣ преломленія съ параллельными и содержащимися въ плоскости чертежа лучами наклоннаго пучка, падающаго на ту же поверхность при той же диафрагмѣ. Для большей ясности наклонный пучекъ изображенъ на отдѣльномъ



фиг. 62.

чертежѣ (фиг. 62). Обращаясь къ этому чертежу, мы видимъ, что нормальный лучъ наклоннаго пучка, т. е. лучъ AC , проходящій черезъ центръ преломляющей поверхности C , раздѣляетъ весь пучекъ прошедшихъ черезъ отверстіе диафрагмы лучей на два неравныхъ пучка, изъ которыхъ первый af расположенъ надъ AC , а другой bg

расположенъ подь AC . Принимая нормальный лучъ AC за ось, мы скажемъ, что всѣ лучи, идущіе параллельно оси AC на высотѣ, превышающей H , собираются въ некоторой точкѣ V , лежащей на оси AC . Такъ какъ $bq < H$ и $df = H$, то въ точкѣ V собираются послѣ преломленія лучи ширokaго пучка bq и лучи пучка df . Остальные же лучи, именно лучи пучка ad , производятъ каустическую кривую линію BV , которая расположится надъ главнымъ лучемъ AV . Другой такой же линіи, которая располагалась бы подь линіей AV симметрично съ первою, не будетъ. Эту кривую BV некоторые оптики называютъ словомъ „кома“. Кома производится исключительно меридіональными лучами, т. е. лучами содержащимися въ осевой плоскости. Изъ сказаннаго видимъ, что есть существенная разница между широкимъ пучкомъ прямымъ (фиг. 61) и широкимъ наклоннымъ (фиг. 62). Въ то время, какъ лучи первого пучка пройдя черезъ отверстіе ab , собираются въ одной точкѣ, лучи наклоннаго пучка, пройдя черезъ то же отверстіе ab , вообще говоря, не пересекаются въ одной точкѣ и производятъ кому. Конечно, кома можетъ происходить не только при прохожденіи лучей черезъ одну преломл. поверхность. Она можетъ происходить и въ оптической системѣ вообще. Размѣры комы зависятъ отъ многихъ обстоятельствъ, напр. нетрудно сообразить по чертежу (фиг. 62), что эти размѣры зависятъ отъ величины отверстія діафрагмы, отъ степени наклоненія наклоннаго пучка, отъ того, какъ далеко отъ стекла располагается діафрагма. Въ нашемъ случаѣ кома уменьшалась бы 1) при уменьшеніи отверстія діафрагмы, 2) при уменьшеніи степени наклоненія наклоннаго пучка и 3) при передвиженіи діафрагмы вправо. Кому можно на опытѣ



фиг. 63.

наглядно наблюдать при помощи простой собирающей линзы значительнаго діаметра и съ короткимъ фокуснымъ разстояніемъ. Чертежъ (фиг. 63) показываетъ, какъ производится опытъ. Замѣтимъ, что опытъ можно производить и при дневномъ свѣтѣ, пользуясь непосредственными лучами солнца. Такъ что на черт. (фиг. 63) AS пред-

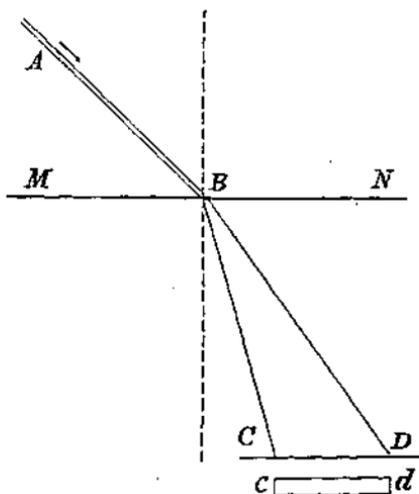
ставляетъ пучекъ солнечныхъ лучей, падающихъ черезъ отверстіе діафрагмы MN на линзу S . Выгодно направлять пучекъ такъ, чтобы крайній лучъ KV проходилъ почти черезъ середину линзы S . Помѣстивъ листъ бѣлой бумаги вдоль преломленнаго пучка SV , какъ бы разсѣкая его, мы легко замѣтимъ на бумагѣ кому BV . Можно наблюдать и каустическую поверхность, пуская на пучекъ SV дымъ

или еще лучше направляя пучекъ SV' въ воду, въ которую пущено нѣсколько капель одеколона, чтобы вода слегка опаллизировала. Понятно, что пуская въ воду капли одеколона, надо ее хорошо перемѣшать.

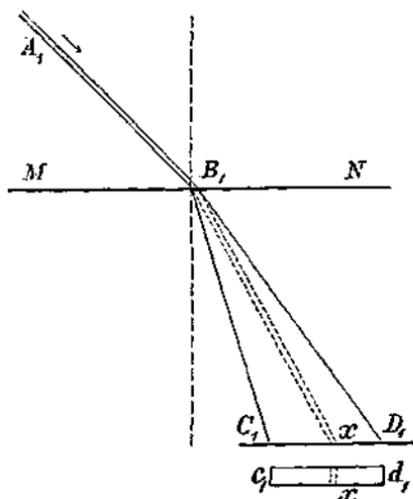
О фотографическихъ объективахъ будемъ говорить въ отдельной статьѣ.

§ 39. Разложеніе свѣта на цвѣта или дисперсія (хроматизмъ).

Изъ физики извѣстно, что если на преломляющую поверхность MN (фиг. 64) падаетъ пучекъ свѣта AB отъ накаленного добѣла твердаго или жидкаго тѣла, то при преломленіи происходитъ разложеніе свѣта на цвѣта или дисперсія. Это явленіе объясняется тѣмъ, что



фиг. 64.



фиг. 65.

бѣлый лучъ свѣта состоитъ изъ простыхъ цвѣтныхъ лучей, которые обладаютъ различною степенью преломляемости. Изъ видимыхъ лучей при нормальной дисперсіи наибольшую преломляемостью обладаютъ фіолетовые, а наименьшую — красные; поэтому лучи бѣлаго пучка AB послѣ преломленія образуютъ расходящійся пучекъ BCD , въ которомъ крайній правый лучъ BD красный, а крайній лѣвый BC — фіолетовый. Лучи пучка BCD на экранѣ CD дали бы разноцвѣтную сплошную полоску, изображенную отдѣльно въ видѣ прямоугольника cd . Эта разноцвѣтная полоска называется сплошнымъ спектромъ. Ширина полоски cd зависитъ отъ длины щели, пропускающей пучекъ AB .

Въ солнечномъ свѣтѣ лучи нѣкоторой преломляемости отсутствуютъ, или правильнѣе сказать, почти отсутствуютъ; поэтому если допустимъ, что A, B_1 (фиг. 65) изображаетъ пучекъ солнечныхъ лучей,

то лучи этого пучка послѣ преломленія дали бы на экранѣ $C_1 D_1$ солнечный спектръ, изображенный отдѣльно въ видѣ прямоугольника $e_1 d_1$. Въ этомъ солнечномъ спектрѣ $e_1 d_1$ всякому отсутствующему цвѣтному лучку $B_1 x$ отвѣчала бы темная полоска x . Этимъ и отличался бы солнечный спектръ $e_1 d_1$ отъ раньше упомянутого сплошного спектра cd . Въ солнечномъ спектрѣ насчитываютъ много (нѣсколько тысячъ) темныхъ полосокъ, которыя называются *фраунгоферовыми линиями* и важнѣйшія изъ нихъ обозначаются буквами латинскаго алфавита.

Если бѣлый лучъ AB (фиг. 66) падаетъ на преломляющую поверхность MN , то, какъ сказано раньше, при преломленіи онъ распадается на безчисленное множество цвѣтныхъ лучей съ различными показателями преломленія. Поэтому если въ данномъ случаѣ является вопросъ объ опредѣленіи показателя преломленія, то предварительно необходимо указать, для какого луча опредѣляется этотъ показатель. Въ нашемъ случаѣ (фиг. 66) показатель преломленія для какого нибудь луча BE , положимъ желтаго, выразится такъ:

$$\frac{\sin ABK}{\sin LBE} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta};$$

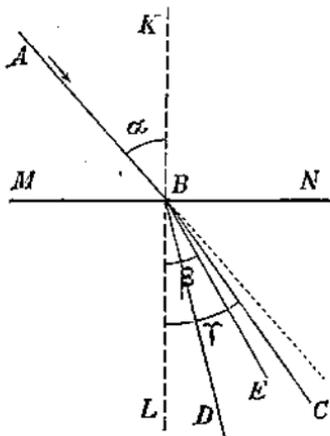
для краснаго луча BC показатель преломленія выразится такъ:

$$\frac{\sin ABK}{\sin LBC} = \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma}$$

и т. д.

Ниже помѣщенная [таблица содержитъ обозначеніе нѣкоторыхъ важнѣйшихъ фраунгоферовыхъ линій въ солнечномъ спектрѣ съ указаніемъ занимаемаго линіями мѣста въ спектрѣ и съ обозначеніемъ длины волны (§ 69) тѣхъ лучей, отсутствіе которыхъ производитъ известную темную линію.

Мы часто будемъ тѣми же буквами A, B, C, D, E, F, G и H называть соответственно и тѣ лучи, которыхъ отсутствіе вызываетъ ту или другую темную линію, такъ что подъ выраженіемъ „лучи C “ будемъ понимать тѣ лучи, отсутствіе которыхъ производитъ въ солнечномъ спектрѣ темную линію C . Показатели же преломленія лучей C будемъ обозначать черезъ n_C . Разность показателей преломленія лучей H и A , т. е. $n_H - n_A$, называется *полною дисперсією*,



фиг. 66.

Обознач. линій	Длина волны въ миллионныхъ част. миллим.	Часть спектра, въ которой находится линия
A	759,41	край красной части
B	686,75	красная
C	656,81	оранжевая
D ₁	589,62	желтая
D ₂	589,02	
E ₁	{ 527,05 527,04 }	зеленая
E ₂		
F	486,15	голубая
G	{ 430,81 430,79 }	синяя
H		
		край фиолетовой части

а разность показателей преломления какихъ нибудь двухъ другихъ лучей называется *частною дисперсіею*.

Недостатки, являющіеся въ изображеніи въ слѣдствіе разложенія свѣта на цвѣта.

§ 40. **Общая замѣчанія о вліяніи дисперсіи на изображенія. Хроматическая разница мѣста и хроматическая разница увеличенія.** Въ предыдущихъ параграфахъ, когда рѣчь шла о ходѣ луча въ преломляющей среднѣ и объ изображеніяхъ предмета, предполагалось, что предметъ посылаетъ лучи какого нибудь опредѣленнаго цвѣта, съ однимъ и тѣмъ же показателемъ преломления и мы видѣли, что въ случаѣ *центральныхъ* лучей изображеніе опредѣляется вообще такими уравненіями:

$$xx' = FF' \text{ и } \frac{y'}{y} = \frac{F}{x} = \frac{x'}{F'}$$

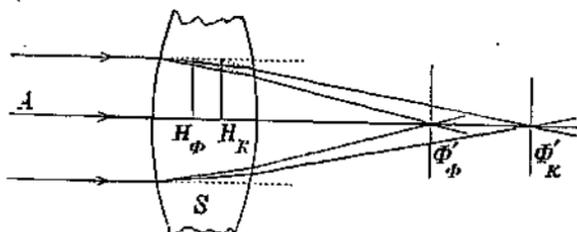
гдѣ F и F' , понятно, зависятъ отъ показателя преломления.

Но если изъ каждой точки предмета исходятъ бѣлые лучи, что въ дѣйствительности обыкновенно и бываетъ, то при преломленіи, каждый бѣлый лучъ разлагается на безчисленное множество цвѣтныхъ лучей и каждый изъ этихъ лучей имѣетъ своего показателя

преломления. Поэтому для луча каждого цвета получаются особые фокусныя разстоянія F и F' , следовательно и особые разстоянія x' и точно также особые увеличения $\frac{y'}{y}$.

Такимъ образомъ центральные лучи, исходящiе отъ бѣлаго предмета, пройдя черезъ преломляющiя поверхности системы, даютъ вообще безчисленное множество разноцвѣтныхъ изображенiй предмета на различныхъ мѣстахъ и различной величины. Первый недостатокъ, состоящiй въ томъ, что разные цвѣтные изображенiя того же предмета занимаютъ разные мѣста, будемъ называть *хроматическою разницею мѣста*, а послѣднiй недостатокъ, состоящiй въ томъ, что разные цвѣтные изображенiя того же предмета имѣютъ разную величину, будемъ называть *хроматическою разницею увеличенiя*.

Обратимъ вниманiе еще на слѣдующее обстоятельство. Пусть



фиг. 67.

на простую линзу S (фиг. 67) падаетъ пучекъ центральныхъ бѣлыхъ лучей, параллельныхъ оси.

Этотъ бѣлый пучекъ падающихъ центральныхъ лучей мы представляемъ себѣ состоящимъ изъ безчисленнаго множества цвѣтныхъ пучковъ. Положимъ, что по выходѣ изъ линзы лучи фиолетоваго пучка собираются въ точкѣ F'_F , краснаго — въ точкѣ F'_K , а лучи другихъ цвѣтныхъ пучковъ — въ нѣкоторыхъ точкахъ, расположенныхъ между F'_F и F'_K . Значитъ, вслѣдствiе дисперсiи у линзы S является безчисленное множество цвѣтныхъ фокусовъ и для безконечно удаленнаго предмета такая система S даетъ безчисленное множество разноцвѣтныхъ изображенiй, расположенныхъ послѣдовательно другъ за другомъ въ соответствующихъ фокусныхъ плоскостяхъ. И такъ вслѣдствiе дисперсiи система можетъ имѣть безчисленное множество разноцвѣтныхъ фокусовъ, которымъ, понятно, соответствуетъ безчисленное множество фокусныхъ разстоянiй.

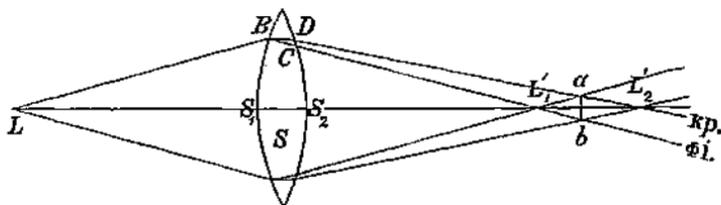
Все что мы говорили до сихъ поръ въ этомъ параграфѣ, относилось къ случаю центральныхъ лучей. Дѣло представляется еще болѣе сложнымъ, если возьмемъ во вниманiе и другiе лучи, т. е. падающiе на преломляющiя поверхности на значительномъ разстоянiи

отъ оси и образующіе значительные углы наклоненія. Тѣ недостатки въ изображеніи, которые обусловливаются вообще нецентральными лучами, распространяются на лучи каждаго цвѣта и система можетъ не имѣть сферич. aberrациі, напр. для красныхъ лучей, но въ то же время эта aberrація можетъ не быть устраненною для лучей другихъ цвѣтовъ.

Недостатки, зависящіе отъ разложенія бѣлаго свѣта на цвѣта, называются *хроматическими*, а система, неимѣющая такихъ недостатковъ, называется *ахроматическою*.

Конечно, мы не въ состояніи приготовить ахроматическую систему въ полномъ смыслѣ этого слова, но мы можемъ устранить существенные хроматическіе недостатки сообразно съ тѣмъ, для какой цѣли готовится система.

§ 41. **Хроматическая aberrація.** Пусть на систему S (фиг. 68) изъ осевой точки L падаютъ бѣлые лучи. Разсмотримъ, одинъ изъ этихъ лучей, напр. LB . Этотъ лучъ, претерпѣвъ въ системѣ пре-



фиг. 68.

ломленіе, по выходѣ изъ нея распадается на цвѣтные лучи. Положимъ, что красный лучъ направляется по DL_2' , а фіолетовый по CL_1' и между крайними лучами DL_2' и CL_1' располагаются остальные цвѣтные лучи. Если бы система S была вполне свободна отъ сферической aberrаціи для лучей каждаго цвѣта, то всѣ красные лучи собрались бы въ точкѣ L_2' , фіолетовые въ L_1' , а остальные цвѣтные лучи собирались бы въ точкахъ, расположенныхъ между L_1' и L_2' ; слѣдовательно, если бы даже система была вполне свободна отъ сферич. aberrаціи для всѣхъ цвѣтовъ, все-таки изображеніе точки L , испускающей бѣлые лучи, не представлялось бы въ видѣ точки. Въ поперечномъ сѣченіи самой узкой части ab выходящаго пучка на экранѣ мы бы получили цвѣтное пятно, которое, какъ наименьшее изъ всѣхъ, какія можно было бы получить на экранѣ, ставя его поперекъ выходящаго пучка, естественнѣе всего принимать за изображеніе точки L . Такимъ образомъ мы видимъ, что вслѣдствіе дисперсіи точка не можетъ изобразиться въ видѣ точки и на самомъ дѣлѣ она изображается въ видѣ пятна. По этой причинѣ происходитъ неотче-

тливость изображенія. Этотъ недостатокъ называется *хроматическою абберраціей*. Хроматическая абберрація имѣеть много сходнаго со сферич. абберраціей, но хроматическая абберрація портитъ изображеніе въ ббльшей степени, чѣмъ сферическая. Хроматическая абберрація очень замѣтна даже для центральныхъ лучей. Замѣтимъ, что по данному разстоянію точки L отъ системы, т. е. по данному LS_1 , мы всегда можемъ для данной системы S вычислить, на какомъ разстояніи отъ системы любой изъ цвѣтныхъ лучей пересѣкаетъ ось, т. е. мы можемъ опредѣлять, напр. S_2L_1' , S_2L_2' и т. д. Способы подобнаго вычисленія изложены въ §§ 8 и 9, для всякаго случая, будетъ ли падающій лучъ LB центральнымъ или нѣтъ. Желая вычислить разстояніе S_2L_1' для фіолетоваго луча CL_1' въ случаѣ, если бы лучъ LB былъ центральнымъ, мы разсуждаемъ такъ. Изъ точки L выходятъ по направленію LB всѣ цвѣтные лучи, составляя въ совокупности одинъ бѣлый лучъ LB ; поэтому весь путь фіолетоваго луча отъ точки L до то точки L_1' въ нашемъ случаѣ представляется въ видѣ ломанной $LBCL_1'$. Обращаясь къ извѣстной намъ формулѣ:

$$\frac{n_1'}{s_1'} - \frac{n_1}{s_1} = \frac{n_1' - n_1}{r_1}$$

и предполагая извѣстными r_1 , $LS_1 = s_1$, n_1' и n_1 , гдѣ подъ n_1' и n_1 понимаются показатели преломленія для *фіолетоваго* луча, мы изъ написаннаго ур. нашли бы неизвѣстное s_1' , а дальнѣйшее вычисленіе шло бы обычнымъ порядкомъ, какъ указано въ § 8, пока, наконецъ не нашли бы $S_2L_1' = s_2'$. Въ случаѣ же, если бы лучъ LB былъ нецентральнымъ, то въ вычисленіяхъ была бы только та разница, что вмѣсто выше написаннаго уравненія мы бы пользовались тригонометрич. формулами, съ которыми мы познакомились въ § 9.

Задача нѣсколько упрощается, если осевая свѣтящаяся точка L очень далеко отъ системы S и всѣ лучи, падающіе на систему отъ этой точки, можно считать параллельными осн.

Вычисливъ длины S_2L_1' и S_2L_2' , мы легко найдемъ разность $S_2L_2' - S_2L_1'$, которая называется *продольною хроматическою абберраціей*.

Предполагая, что свѣтъ идетъ слѣва направо, мы будемъ называть систему *хроматически недоисправленною*, если точка схожденія красныхъ лучей располагается вправо отъ точки схожденія фіолетовыхъ лучей и тогда будемъ считать хроматическую абберрацію *положительною*; если же точка схожденія красныхъ лучей располагается влѣво отъ точки схожденія фіолетовыхъ лучей, то система называется *переисправленною* и тогда у насъ хромат. абберрація будетъ считаться

отрицательною. Согласно сказанному для простой собирательной линзы хромат. aberrация, какъ показываетъ чертежъ (фиг. 68), положительная.

Нетрудно сообразить, что для разсѣиват. линзы хром. aberrация отрицательная. Составляя систему изъ собирательныхъ и разсѣивательныхъ линзъ, можно ослабить или даже уничтожить хроматическую aberrацию. Если бы разсѣивательная линза была изъ того же вещества, что и собирательная, то уничтожая хроматическую aberrацию соединеніемъ такихъ линзъ, мы бы уничтожили и собирательную способность собирательной линзы и выходящій лучъ изъ такой системы былъ бы параллеленъ первоначальному своему направленію. Обыкновенно собирательная линза готовится изъ кропгласа, а разсѣивательная—изъ флинтгласа, причѣмъ флинтгласовая разсѣивательная линза, уничтожая хроматическую aberrацию собирательной линзы, не должна уничтожать вполне собирательной способности ея.

§ 42. **Условіе полнаго ахроматизма для центральныхъ лучей.**
Ахроматическій объективъ. Въ случаѣ центральныхъ лучей мы ввели (§ 18) для изображенія общія уравненія вида:

$$xx' = FF' \text{ и } \frac{y'}{y} = \frac{F}{x} = \frac{x'}{F'}$$

Первое уравненіе опредѣляетъ мѣсто изображенія, а второе—увеличеніе. Мы уже говорили въ параграфѣ 40, что мѣсто и увеличеніе изображенія мѣняются въ зависимости отъ цвѣта луча и вслѣдствіе дисперсіи происходитъ два недостатка: хроматическая разница мѣста и хроматическая разница увеличенія. Ахроматизмъ вполне достигается для центральныхъ лучей съ устраненіемъ означенныхъ двухъ недостатковъ. Чтобы устранить эти недостатки, т. е. чтобы заставить всѣ цвѣтныя изображенія быть въ томъ же мѣстѣ и той же величины и слѣдовательно вполне совпадать, необходимо соблюденіе условія, чтобы для всѣхъ цвѣтовъ фокусы Φ и Φ' , а равно и фокусныя разстоянія F и F' были идентичны (тѣ же). Тогда и главныя точки для всѣхъ цвѣтовъ будутъ совпадать, ибо фокуснымъ разстояніемъ называется разстояніе главной точки отъ фокуса, а если для каждаго цвѣта фокусомъ будетъ та же общая точка и главное фокусное разстояніе будетъ одно и то же, то, понятно, и главныя точки всѣхъ цвѣтовъ будутъ совпадать въ одну общую точку.

Но въ случаѣ идеальныхъ линзъ условіе для устраненія обоихъ недостатковъ (хроматическая разница мѣста и хромат. разница увеличенія) упрощается и выражается лишь въ томъ, чтобы фокусныя разстоянія для всѣхъ цвѣтовъ были одинаковыми. Это происходитъ оттого, что въ случаѣ идеальныхъ линзъ, согласно уравненіямъ $\Psi = 0$

и $\Psi' = 0$ (§ 31) главные точки совпадают съ общою вершиною поверхностей линз независимо отъ показателя преломленія и слѣдовательно независимо отъ цвѣта; поэтому при идентичности фокусныхъ разстояній и фокусы всѣхъ цвѣтовъ совпадаютъ. Сами уравненія (39) и (40) въ случаѣ линзъ замѣнятся такими:

$$ax' = -F^2 \quad \text{и} \quad \frac{y'}{y} = \frac{F}{x}.$$

Представимъ себѣ теперь сложную идеальную линзу, составленную изъ двухъ прилегающихъ другъ къ другу идеальныхъ линзъ.

Для такой системы имѣеть мѣсто ур. (§ 33):

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F''} + \frac{1}{F'''} \quad \dots \quad (70)$$

гдѣ F , F'' и F''' обозначаютъ соответственно фокусныя разстоянія: системы, первой линзы и второй линзы. Для первой линзы въ свою очередь по § 31 имѣеть мѣсто уравненіе:

$$\frac{1}{F''} = (n' - 1) \left(\frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} \right),$$

гдѣ r'_1 и r'_2 радиусы поверхностей линзы, n' — ея показатель преломленія.

Введемъ слѣдующія обозначенія:

$$\frac{1}{F''} = \varphi', \quad \frac{1}{r'_1} = \rho'_1, \quad \frac{1}{r'_2} = \rho'_2 \quad \text{и} \quad \frac{1}{r'_1} - \frac{1}{r'_2} = \rho'_1 - \rho'_2 = k'.$$

при чемъ замѣтимъ, что вообще $\frac{1}{F}$ называется *силою* линзы,

а $\frac{1}{r} = \rho$ *кривизною* соответствующей поверхности ея.

Окончательно для первой линзы получимъ уравненіе:

$$\frac{1}{F''} = \varphi' = (n' - 1) k' \quad \dots \quad (71)$$

Такъ же точно для другой линзы получимъ уравненіе:

$$\frac{1}{F'''} = \varphi'' = (n'' - 1) k'' \quad \dots \quad (72)$$

поэтому ур. (70) переписнется такъ:

$$\frac{1}{F} = (n' - 1) k' + (n'' - 1) k'' \quad \dots \quad (73)$$

До сихъ поръ мы ничего не говорили о томъ, къ какимъ лучамъ относятся показатели преломленія n' и n'' . Положимъ, что мы опредѣляемъ фокусное разстояніе F для голубыхъ лучей F и при

такимъ предположеніи перепишемъ формулу (73) такъ :

$$\frac{1}{F_F} = (n'_F - 1) k' + (n''_F - 1) k'' \dots \dots \dots (74)$$

гдѣ подѣ буквами F_F , n'_F и n''_F понимаются соответственно фокусное разстояніе системы и показатели преломленія 1-ой и 2-ой линзъ для голубыхъ лучей.

Точно такъ же для оранжевыхъ лучей C получимъ уравненіе :

$$\frac{1}{F_C} = (n'_C - 1) k' + (n''_C - 1) k'' \dots \dots \dots (75)$$

Чтобы фокусныя разстоянія системы были одинаковы, какъ для голубыхъ, такъ и для оранжевыхъ лучей, необходимо условіе :

$$\frac{1}{F_F} = \frac{1}{F_C},$$

т. е.

$$(n'_F - 1) k' + (n''_F - 1) k'' = (n'_C - 1) k' + (n''_C - 1) k''$$

или

$$(n'_F - n'_C) k' + (n''_F - n''_C) k'' = 0 \dots \dots \dots (76)$$

откуда получаемъ такое равенство :

$$\frac{k'}{k''} = - \frac{n''_F - n''_C}{n'_F - n'_C} \dots \dots \dots (77)$$

Изъ ур. (71) и (72) для среднего луча D получимъ :

$$\frac{1}{F'_D} = (n'_D - 1) k' \text{ и } \frac{1}{F''_D} = (n''_D - 1) k'' \dots \dots \dots (78)$$

откуда имѣемъ :

$$\frac{k' (n'_D - 1)}{k'' (n''_D - 1)} = \frac{F''_D}{F'_D}$$

или

$$\frac{k'}{k''} \cdot \frac{n'_D - 1}{n''_D - 1} = \frac{F''_D}{F'_D}.$$

Последнее равенство на основаніи ур. (77) перепишется такъ :

$$\frac{F''_D}{F'_D} = - \frac{n''_F - n''_C}{n''_D - 1} \cdot \frac{n'_D - 1}{n'_F - n'_C} \dots \dots \dots (79)$$

Выраженіе $\frac{n'_F - n'_C}{n'_D - 1}$ называютъ *относительной дисперсіей* ве-

щества, и вводить такое обозначение:

$$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = \nu;$$

поэтому ур. (79) переписывается так:

$$\frac{F''_D}{F'_D} = -\frac{\nu'}{\nu''} \dots \dots \dots (80)$$

Значитъ, если будетъ соблюдено условіе (79) или, что одно и то же, условіе (80), то для лучей F и C въ такой системѣ получатся одинакія фокусныя разстоянія и поэтому если на нашу систему упадетъ пучекъ центральныхъ бѣлыхъ лучей, параллельныхъ осц, то по выходѣ изъ системы лучи F и C соберутся въ одной точкѣ; но тогда и лучи остальныхъ цвѣтовъ соберутся почти въ той же точкѣ, что и упомянутыя лучи F и C . Последнее подтверждается опытомъ.

Поэтому, когда готовятъ ахроматическій объективъ изъ тонкихъ линзъ, то стараются, чтобы онъ удовлетворялъ условію (79).

Такъ какъ изъ сказаннаго вытекаетъ, что при соблюденіи условія (79) фокусное разстояніе системы почти не измѣняется при измѣненіи цвѣта лучей, то на основаніи ур. (73) можемъ написать:

$$\frac{1}{F} = (n'_D - 1)k' + (n''_D - 1)k'' \dots \dots \dots (81)$$

Опредѣляя изъ ур. (76) и (81) величины k' и k'' , мы получимъ:

$$\left. \begin{aligned} \rho_1' - \rho_2' = k' &= \frac{1}{F(n'_F - n'_C)(\nu' - \nu'')} \\ \rho_1'' - \rho_2'' = k'' &= -\frac{1}{F(n''_F - n''_C)(\nu' - \nu'')} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (82)$$

Такъ какъ послѣднія равенства (82) представляютъ слѣдствіе равенства (76), то они такъ же, какъ и ур. (79), представляютъ условіе ахроматизма.

Ур. (82) даютъ намъ такое правило:

Комбинація двухъ идеальныхъ линзъ, прилегающихъ другъ къ другу, тогда только можетъ быть ахроматическою, когда линзы изъ различныхъ веществъ, для которыхъ ν' не $= \nu''$.

Ур. (79) даетъ такое правило:

Фокусныя разстоянія линзъ для луча D должны быть съ обратными знаками и должны относиться, какъ относительныя дисперсіи тѣхъ веществъ, изъ которыхъ сдѣланы линзы.

Условіе, по которому линзы, входящія въ составъ ахроматической системы, должны имѣть фокусныя разстоянія съ обратными знаками, показываетъ, что *одна изъ линзъ должна быть собирательною, а другая разсѣвательною* (§ 28).

Изъ уравненія

$$\frac{1}{F'} = \frac{1}{F''} + \frac{1}{F'''}$$

имѣемъ:

$$\varphi = \varphi' + \varphi'',$$

причемъ въ силу послѣдняго правила φ' и φ'' должны быть съ обратными знаками; поэтому φ будетъ положительнымъ или отрицательнымъ, смотря по тому, будетъ ли сила собирательной линзы больше или меньше абсолютной величины силы разсѣвательной линзы. При $\varphi > 0$ система окажется собирательною и обратно: при $\varphi < 0$ система окажется разсѣвательною.

Еще сдѣлаемъ одно, сюда относящееся, замѣчаніе. Идеальныхъ линзъ и системъ на практикѣ не существуетъ. Желая по возможности ближе подойти къ требованіямъ теоріи надо заботиться о томъ, чтобы изготовляемые для ахроматической системы линзы были по возможности тонкія, что опять въ свою очередь влечетъ за собою требованіе, чтобы радиусы поверхностей линзъ были большіе. Обращая вниманіе на равенства (82), заключаемъ, что для выполненія послѣдняго требованія лучше брать вещества, для которыхъ $\nu' - \nu''$ по возможности большое. Хотя въ виду другихъ расчетовъ иногда приходится поневоль выбрать вещества съ малымъ значеніемъ $\nu' - \nu''$.

§ 43. **Вторичный спектръ и его уничтоженіе.** Въ предыдущемъ параграфѣ мы вывели условія для того, чтобы лучи двухъ цвѣтовъ, именно лучи F и C , сходились въ одной точкѣ. При соблюденіи этихъ условій остальные цвѣтные лучи въ точности не сходятся въ той же точкѣ, что и лучи F и C , т. е. дисперсія не уничтожается вполне. Образующійся при этомъ остатокъ дисперсіи называется *вторичнымъ спектромъ*. Присоединяя къ первымъ двумъ линзамъ еще третью изъ новаго вещества, можно заставить лучи трехъ цвѣтовъ сходиться въ одной точкѣ. Строго говоря, даже и въ послѣднемъ случаѣ хроматизмъ не вполне уничтожается и ничтожный остатокъ его называется *третичнымъ спектромъ*. Вообще чтобы сходились въ одной точкѣ лучи n цвѣтовъ, нужно ввести въ систему n линзъ изъ разныхъ веществъ. Въ нынѣшнее время есть возможность устранить или, точнѣе говоря, значительно ослабить вторичный спектръ при помощи только двухъ линзъ, благодаря качествамъ новаго іенскаго стекла, которое изготовляется въ Іенѣ на фабрикѣ Шотта.

Пояснимъ, какимъ образомъ это достигается. Для лучей F и C мы имѣли формулы (74) и (75). Аналогично съ этимъ для какого нибудь третьяго луча x будемъ имѣть:

$$\frac{1}{F'_x} = (n'_x - 1) k' + (n''_x - 1) k'' \dots \dots \dots (83)$$

Изъ формулъ (75) и (83) получаемъ такое равенство:

$$\frac{1}{F'_C} - \frac{1}{F'_x} = \frac{F_x - F_C}{F'_x F'_C} = (n'_C - n'_x) k' + (n''_C - n''_x) k'' \dots (84)$$

Предположимъ, что лучи F и C сходятся въ одной точкѣ; тогда имѣютъ мѣсто равенства (82). Подставивъ въ ур. (84) вмѣсто k' и k'' ихъ значенія изъ урав. (82), мы получимъ:

$$\frac{F_x - F_C}{F'_x F'_C} = \frac{1}{F'(v' - v'')} \left[\frac{n'_C - n'_x}{n'_F - n'_C} - \frac{n''_C - n''_x}{n''_F - n''_C} \right] \dots \dots \dots (85)$$

Для уничтоженія вторичнаго спектра необходимо, чтобы имѣло мѣсто равенство:

$$F_x - F_C = 0.$$

Последнее равенство дѣйствительно будетъ имѣть мѣсто, если множитель правой части ур. (85), заключенный въ ломанныя скобки, т. е.

$$\frac{n'_C - n'_x}{n'_F - n'_C} - \frac{n''_C - n''_x}{n''_F - n''_C}$$

будетъ равняться нулю, т. е. если

$$\frac{n'_C - n'_x}{n'_F - n'_C} = \frac{n''_C - n''_x}{n''_F - n''_C} \dots \dots \dots (86)$$

Благодаря продолжительнымъ изысканіямъ Аббе и Шотта теперь есть возможность готовить стекла, которыя очень близко удовлетворяютъ условію (86). Значитъ есть возможность приготовить два такихъ стекла, изъ которыхъ каждое имѣетъ свою преломляемость, но ходъ дисперсін у обоихъ стеколъ почти одинаковъ, т. е. отношеніе частныхъ дисперсій почти одинаково для обоихъ стеколъ.

Ниже приведены примѣры такихъ стеколъ, которыя близко удовлетворяютъ усл. (86), при чемъ одно стекло 0,60 изъ числа старыхъ.

Фабр. знакъ	Название стеколь	n_D	$n_F - n_C$	$\nu =$	$n_D - n_{A'}$	$n_F - n_D$	$n_{G'} - n_F$
				$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$			
0.60	Gal.-Silicat-Crown	1,5179	0,00860	60,2	0,00553	0,00605	0,00487
S.8	Borat-Flint	1,5736	0,01129	50,8	0,00728	0,00795	0,00644
0.225	Leicht.Phosph.Crown	1,5159	0,00737	70,0	0,00485	0,00515	0,00407
S.35	Borat-Flint	1,5503	0,00996	55,2	0,00654	0,00699	0,00561

На основании этой таблицы можемъ составить такую :

Фабрич. знакъ	$\frac{n_D - n_{A'}}{n_F - n_C}$	$\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$	$\frac{n_{G'} - n_F}{n_F - n_C}$
0.60	0,643	0,703	0,566
S.8	0,645	0,704	0,571
0,225	0,658	0,698	0,552
S.35	0,656	0,702	0,563

Разсматривая послѣднюю таблицу, мы видимъ, что, какъ для первой пары стеколь 0.60 и S.8, такъ и для второй 0.225 и S.35 отношенія

$$\frac{n_D - n_{A'}}{n_F - n_C}, \quad \frac{n_F - n_D}{n_F - n_C} \quad \text{и} \quad \frac{n_{G'} - n_F}{n_F - n_C}$$

почти одинаковы; поэтому изъ каждой пары такихъ стеколь возможно составить двойную ахроматическую линзу съ ничтожнымъ вторичнымъ спектромъ. Такія стекла рекомендуются для приготовления телескопическихъ объективовъ. На заводѣ Шотта въ Йенѣ означенныя стекла изготовляются между прочимъ и въ видѣ кружковъ разныхъ размѣровъ*).

Замѣтимъ еще, что старыя стекла отличаются тѣмъ, что большей преломляемости (n_D) отвѣчаетъ и большее разсѣяние ($n_F - n_C$). Между тѣмъ въ числѣ новыхъ стеколь находятся и такія, которыя обладаютъ обратнымъ качествомъ, напр.

	n_D	$n_F - n_C$
Baryumsilicat	1,6112	0,01747
Natronbleiglas	1,5205	0,01956

*) Glasschmelzerei.—Schott & Genossen.—Jena.

§ 44. **Выборъ цвѣтовъ для соединенія.** Что касается вопроса, какіе цвѣтные лучи полезнѣе всего соединять для ахроматизаціи системы, то рѣшеніе его обусловливается тѣмъ, для какой цѣли имѣеть быть ахроматическая система. Если при помощи ахроматической системы мы намѣрены разсматривать предметы, т. е. желаемъ пользоваться ею для вооруженія глаза, то слѣдуетъ заботиться о соединеніи такихъ цвѣтовъ, которые при смѣшеніи давали бы бѣлый цвѣтъ. Кроме того соединяемые цвѣта должны быть по возможности яркіе. Въ спектрѣ самымъ яркимъ цвѣтомъ для глаза считается желтый. Бѣлый цвѣтъ получается, если смѣшиваются такъ называемые въ физикѣ дополнительные цвѣта.

Слѣдующіе цвѣта дополнительные:

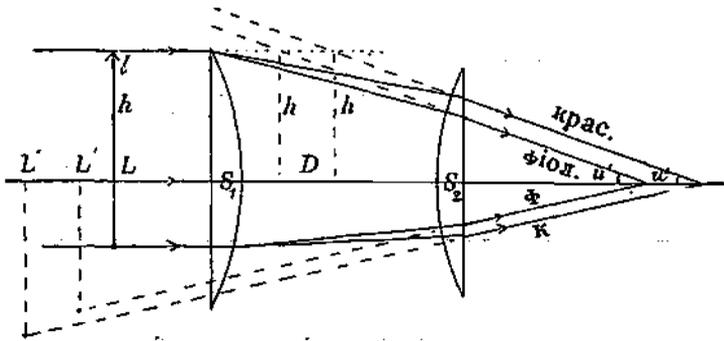
фіолетовый и желтозеленый,
синій и желтый,
голубой и оранжевый,
голубоватозеленый и красный.

При устройствѣ системы для вооруженія глаза (телескопъ, микроскопъ и т. п.) особенное вниманіе обращаютъ на лучи C , D и F . Обыкновенно вычисляютъ систему такъ, чтобы лучи C (оранжевые) и F (голубые) соединялись въ одной точкѣ; тогда и яркіе лучи въ промежуткѣ отъ C до F будутъ сходиться почти тамъ же, гдѣ сходятся лучи C и F . При этомъ для самыхъ яркихъ лучей D полезно (иногда необходимо) дѣлать систему (объективъ) свободною отъ сферической аберраціи по всѣмъ зонамъ.

Что же касается фотографическихъ системъ, то нужно имѣть въ виду, что фотографическія пластинки неодинаково чувствительны къ лучамъ разныхъ цвѣтовъ. Чувствительность ихъ возрастаетъ, начиная отъ желтыхъ лучей до фіолетовыхъ и дальше. Максимальное дѣйствіе на пластинку находится въ лучахъ между G (синіе) и H (фіолетовые); поэтому въ фотографическихъ системахъ надо главнымъ образомъ заботиться о соединеніи группы лучей отъ G до H , причемъ для лучей G дѣлаютъ систему сферически исправленною. Но чтобы изображеніе было выразительно по возможности и для глаза, нужно чтобы въ числѣ соединяемыхъ лучей были еще и лучи, сильно дѣйствующіе на глазъ, какъ напр. лучи D , т. е. нужно заботиться, чтобы химическій фокусъ совпадалъ съ оптическимъ.

Часто на практикѣ при вычисленіи фотографическихъ системъ считаютъ вполне достаточнымъ соединить лучи D съ G' , заботясь при томъ, чтобы относительно лучей G' фотографич. система была сферически исправленною, а для объективовъ микроскопа въ крайнихъ случаяхъ ограничиваются соединеніемъ лучей D и F , дѣлая систему сферически исправленною въ отношеніи лучей D .

§ 45. Выводъ условий для устройства окуляра или лупы. Въ предыдущемъ параграфѣ мы разсматривали систему изъ двухъ линзъ, прилегающихъ другъ къ другу и находили условия для ахроматизаціи такой системы. Теперь рассмотримъ оптическую систему изъ двухъ линзъ, не прилегающихъ другъ къ другу. Пусть чертежъ



фиг. 69.

(фиг. 69) представляетъ такую систему, гдѣ S_1 и S_2 двѣ весьма тонкія линзы, находящіяся на конечномъ разстояніи другъ отъ друга. Такой системѣ вообще свойственны оба недостатка: хроматическая разница мѣстъ и хроматическая разница увеличенія. Выведемъ условіе, при которомъ фокусныя разстоянія двухъ цвѣтныхъ лучей C и F одинаковы для системы. Въ параграфѣ 33 мы уже разсматривали систему, состоящую изъ двухъ линзъ, и вывели для нея формулу:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} - \frac{D}{F_1 F_2}$$

Предположимъ, что линзы настолько тонкія, что безъ большой погрѣшности можно считать D равнымъ разстоянію между линзами.

Для цвѣтныхъ лучей C перепишемъ нашу формулу такъ:

$$\frac{1}{F_C} = \frac{1}{F'_C} + \frac{1}{F''_C} - \frac{D}{F'_C \cdot F''_C}$$

Точно такъ же для цвѣтныхъ лучей F напишемъ:

$$\frac{1}{F_F} = \frac{1}{F'_F} + \frac{1}{F''_F} - \frac{D}{F'_F \cdot F''_F}$$

Чтобы фокусныя разстоянія для лучей C и F были одинаковы, т. е. чтобы имѣло мѣсто равенство:

$$\frac{1}{F_C} = \frac{1}{F_F}$$

необходимо условие:

$$\frac{1}{F'_C} + \frac{1}{F''_C} - \frac{D}{F'_C F''_C} = \frac{1}{F'_F} + \frac{1}{F''_F} - \frac{D}{F'_F F''_F},$$

откуда имеем:

$$D = \frac{\left(\frac{1}{F'_F} - \frac{1}{F'_C}\right) + \left(\frac{1}{F''_F} - \frac{1}{F''_C}\right)}{\frac{1}{F'_F F''_F} - \frac{1}{F'_C F''_C}}$$

Но заметим, что

$$\begin{aligned} \frac{1}{F'_F F''_F} - \frac{1}{F'_C F''_C} &= \frac{1}{F'_F F''_F} - \frac{1}{F'_C F''_C} - \frac{1}{F''_F F'_C} + \frac{1}{F''_F F'_C} \\ &= \frac{1}{F''_F} \left(\frac{1}{F'_F} - \frac{1}{F'_C}\right) + \frac{1}{F'_C} \left(\frac{1}{F''_F} - \frac{1}{F''_C}\right); \end{aligned}$$

следовательно

$$D = \frac{\left(\frac{1}{F'_F} - \frac{1}{F'_C}\right) + \left(\frac{1}{F''_F} - \frac{1}{F''_C}\right)}{\frac{1}{F''_F} \left(\frac{1}{F'_F} - \frac{1}{F'_C}\right) + \frac{1}{F'_C} \left(\frac{1}{F''_F} - \frac{1}{F''_C}\right)}.$$

На основании ур. (71) и (72) — § 42 можем написать:

$$\frac{1}{F'_F} - \frac{1}{F'_C} = (n'_F - n'_C) k' \quad \text{и} \quad \frac{1}{F''_F} - \frac{1}{F''_C} = (n''_F - n''_C) k''.$$

Эти две формулы на основании ур. (78) — § 42 переписываются так:

$$\frac{1}{F'_F} - \frac{1}{F'_C} = \frac{1}{F'_D \cdot \nu'} \quad \text{и} \quad \frac{1}{F''_F} - \frac{1}{F''_C} = \frac{1}{F''_D \cdot \nu''};$$

поэтому

$$D = \frac{\frac{1}{F'_D \cdot \nu'} + \frac{1}{F''_D \cdot \nu''}}{\frac{1}{F''_F} \cdot \frac{1}{F'_D \cdot \nu'} + \frac{1}{F'_C} \cdot \frac{1}{F''_D \cdot \nu''}}.$$

Обозначим фокусное расстояние первой линзы S через F' , а второй через F'' и принимая (без большой погрешности), что

$$F''_F = F''_D = F'' \quad \text{и} \quad F'_C = F'_D = F',$$

получимъ

$$D = \frac{\nu' F' + \nu'' F''}{\nu' + \nu''}.$$

Послѣднее уравненіе и есть искомое условіе. Если обѣ линзы S_1 и S_2 изъ того же вещества, то послѣдняя формула обратится въ такую:

$$D = \frac{F' + F''}{2} \dots \dots \dots (87);$$

откуда получаемъ такое правило:

Система, состоящая изъ двухъ линзъ, имѣетъ (почти) одинакія фокусныя разстоянія для цвѣтныхъ лучей, если разстояніе между линзами равно полусуммѣ ихъ фокусныхъ разстояній и если кромѣ того обѣ линзы изъ одного и того же вещества.

Замѣтимъ, что соблюденіе условія (87) не устраняетъ еще недостатка, называемаго хроматическою разницею мѣста и фокусы для различныхъ цвѣтовъ при соблюденіи условія (87) могутъ совсѣмъ не совпадать, но все таки соблюденіе этого условія достаточно для достиженія той цѣли, для которой предназначается окуляръ или лупа. Чтобы это выяснить, обозначимъ черезъ F' второе фокусное разстояніе системы (фиг. 69), тогда будетъ имѣть мѣсто равенство

$$F' = \frac{h}{\operatorname{tg} u'}.$$

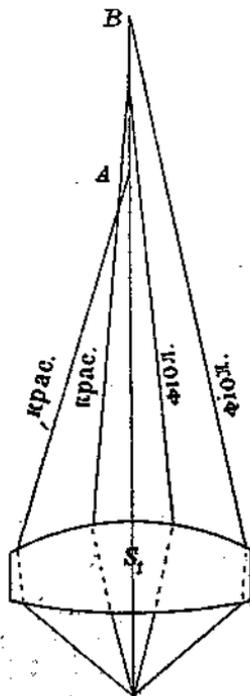
Такъ какъ для цвѣтныхъ лучей h и F' при соблюденіи условія (87) остаются одинаковыми, то и u' для различныхъ цвѣтовъ остается одинаковымъ. Значитъ, если бы въ первомъ фокусѣ системы помещался предметъ Ll (фиг. 69), то разноцвѣтныя изображенія этого предмета видны были бы въ безконечности подъ однимъ и тѣмъ же угломъ u' ; поэтому они казались бы совпадающими и во всей своей совокупности произвели бы впечатлѣніе одного неокрашеннаго изображенія. Если допустимъ, что предметъ lL не въ фокусѣ, а весьма близко отъ него, какъ это и бываетъ на дѣлѣ при употребленіи окуляра или лупы, то явленіе въ общемъ мало измѣнится и изображеніе по прежнему представится наблюдателю неокрашеннымъ. На этомъ основаніи и строятъ окуляры и лупы. Что же касается до того обстоятельства, что разноцвѣтныя изображенія въ сущности занимаютъ равныя мѣста, то это, какъ показываетъ непосредственное наблюденіе, не вызываетъ замѣтнаго неудобства.

Но наша система даже при соблюденіи условія (87) не годилась бы для полученія дѣйствительнаго изображенія на экранѣ. Въ этомъ послѣднемъ случаѣ каждую изъ линзъ S_1 и S_2 выгодно было бы сдѣлать ахроматическою.

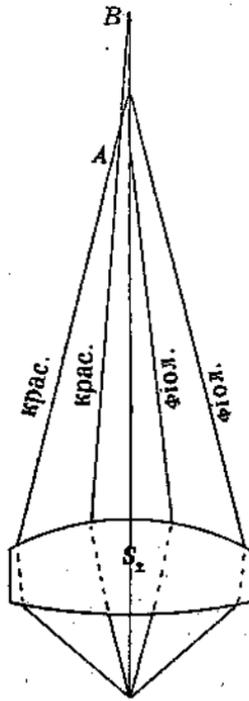
Заметим еще, что на чертежѣ (фиг. 69) $h = Ll$ представляет линейную величину предмета, а u' — видимый диаметр изображения.

О конструкции окуляровъ будетъ говорить послѣ § 91.

§ 46. **Хроматическая разниа сферической аберраціи.** Если въ системѣ съ большимъ отверстіемъ сферическая аберрація для какого нибудь цвѣта устранена, то это еще не значитъ, чтобы она была устранена и для остальныхъ цвѣтовъ. Поэтому при значительномъ отверстіи системы иногда происходитъ такъ называемая *хроматическая разниа сферической аберраціи*. Этотъ недостатокъ особенно трудно иногда уничтожить въ объективахъ для микроскоповъ. Чертежи (фиг. 70) и (фиг. 71), выясняютъ въ чемъ именно состоитъ означенный недостатокъ. Чтобы не усложнять чертежей,



фиг. 70.



фиг. 71.

красные лучи изображены только по одной сторонѣ оси, а фіолетовые—по другой. Оба чертежа представляютъ двѣ системы S_1 и S_2 , изъ которыхъ каждая предполагается свободною отъ сферической аберраціи для желтыхъ лучей, какъ самыхъ интенсивныхъ для глаза. Желтые лучи не изображены на чертежѣ. Относительно остальныхъ лучей системы S_1 и S_2 не свободны отъ сферической аберраціи и обѣ въ отношеніи красныхъ лучей являются сферически недоисправленными, а въ отношеніи фіолетовыхъ—сферически переисправленными. Первая система S_1 ахроматична для центральныхъ лучей, а вторая S_2 — для крайнихъ.

Такъ какъ хроматическая разниа сферической аберраціи представляетъ существенный недостатокъ въ системѣ особенно при большомъ отверстіи ея, то для ослабленія этого существеннаго недостатка необходимо ахроматизировать систему не для центральныхъ лучей и даже не для крайнихъ, а для нѣкоторыхъ промежуточныхъ, падающихъ на промежуточную зону поверхности системы. Тогда расстояние между точками A и B уменьшается. Подъ A мы понимаемъ точ-

ку схождения лучей, самую близкую къ системѣ, а подъ B — точку схождения лучей, самую отдаленную отъ системы. Въ первой системѣ S_1 (фиг. 70), ахроматичной для центральныхъ лучей, точки схождения фиолетовыхъ лучей слишкомъ далеко отодвинуты отъ самой системы, а во второй системѣ S_2 (фиг. 71), ахроматичной для крайнихъ лучей, слишкомъ далеко отодвинуты точки схождения красныхъ лучей, а такъ какъ система, ахроматичная для промежуточныхъ лучей, представляла бы нечто среднее между системами S_1 и S_2 , то разстояніе между A и B уменьшилось бы. Находить, что слѣдуетъ ахроматизировать объективъ на высотѣ $h = 0,866 r$, гдѣ r радиусъ отверстия объектива, а высота h считается отъ оси по перпендикуляру къ ней до той зоны, для которой производится ахроматизація. Другіе принимаютъ за правило ахроматизировать объективы на высотѣ $h = 0,7 r$.

§ 47. Измѣненіе отношенія синусовъ съ измѣненіемъ цвѣта.

Намъ слѣдуетъ обратить вниманіе еще на одинъ недостатокъ, который является при относительно большомъ отверстіи системы. Въ § 35 мы видѣли, что система апланатическая въ томъ случаѣ, если при отсутствіи сферической аберраціи для осевыхъ точекъ соблюдено условіе синусовъ, которое представляется такъ:

$$\frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{n'}{n} \cdot \beta_0.$$

Но для различныхъ цвѣтовъ это отношеніе синусовъ различно, потому что отношеніе $\frac{n'}{n}$ съ измѣненіемъ цвѣта мѣняется.

Поэтому, чтобы система была апланатическою для нѣсколькихъ цвѣтовъ, напр. двухъ, необходимо, чтобы для этихъ цвѣтовъ было соблюдено условіе синусовъ.

Системы, которыя апланатичны для многихъ цвѣтовъ и свободны отъ вторичнаго спектра, называются *апохроматами*. Такую систему долженъ представлять и объективъ для микроскопа въ томъ случаѣ, если мы желаемъ при помощи его достигнуть по возможности лучшихъ результатовъ при наблюденіи.

ГЛАВА II.

Нѣкоторыя замѣчанія о вычисленіи и конструкціи объективовъ.

§ 48. **Объективы для телескоповъ.** Если объективъ предназначается для бинокля или малой подзорной трубы и диаметр его отверстия не превосходить 5 сантиметровъ, то вычисленіе такого объектива совсѣмъ нетрудно. Тогда уже формулы (82), выведенныя въ § 42, являются достаточными для вычисленія объектива. Означенныя формулы (82) можно представить такъ:

$$\frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} = \frac{1}{F(n_F' - n_C')(v' - v'')} \dots \dots \dots \text{(I)}$$

$$\frac{1}{r_1''} - \frac{1}{r_2''} = - \frac{1}{F(n_F'' - n_C'')(v' - v'')} \dots \dots \dots \text{(II)}$$

Написанныя формулы при заданныхъ значеніяхъ F , n_F' , n_C' , n_F'' , n_C'' , v' и v'' представляютъ два уравненія съ четырьмя неизвѣстными: r_1' , r_2' , r_1'' и r_2'' ; поэтому мы можемъ ввести еще два условія для искомымъ радиусовъ. Мы примемъ, во первыхъ, что $r_2' = r_1''$; это будетъ значить, что кривизна тѣхъ поверхностей, по которымъ линзы соприкасаются, одинакова для обѣихъ линзъ и слѣдовательно такія линзы могутъ быть склеены. Линзы склеиваются канадскимъ бальзамомъ. Во вторыхъ, мы введемъ еще условіе $r_2'' = \infty$, т. е. примемъ послѣднюю поверхность второй линзы за плоскость. При послѣднемъ условіи очевидно $\frac{1}{r_2''} = 0$ и изъ ур. (II) непосредственно получаемъ:

$$r_1'' = - (n_F'' - n_C'')(v' - v'') F.$$

Такъ какъ мы приняли, что $r_1'' = r_2'$, то можемъ написать:

$$r_2' = r_1'' = - (n_F'' - n_C'') (v' - v'') \cdot F \dots (III)$$

Подставивъ въ ур. (I) вмѣсто r_2' только что найденное для него значеніе, мы получимъ:

$$\frac{1}{r_1'} - \frac{1}{F (n_F'' - n_C'') (v' - v'')} = \frac{1}{F (n_F' - n_C') (v' - v'')}$$

или

$$\frac{1}{r_1'} = \frac{1}{F (n_F'' - n_C'') (v' - v'')} + \frac{1}{F (n_F' - n_C') (v' - v'')} \dots (IV)$$

Уравненія (III) и (IV) опредѣляютъ искомыя значенія радиусовъ.

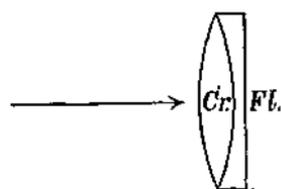
Численный примѣръ:

Положимъ намъ нужно по этимъ формуламъ вычислить радиусы для объектива, приготовляемаго изъ такихъ стеколъ:

фабр. №.	n_D	$n_F - n_C$	v	
кронгласъ...	0.60	1,5173	0,00855	60,5
флинтгласъ...	0.93	1,6243	0,01746	35,8

кронгласъ...

флинтгласъ...



фиг. 72.

Мы будемъ предполагать, что первая линза (лѣвая) фиг. 72 изъ кронгласа, а вторая (правая) — изъ флинтгласа. На основаніи послѣдней таблицы и уравненія (III) непосредственно получаемъ:

$$r_2' = r_1'' = -0,01746 \cdot 24,7 \cdot F = -0,431262 F;$$

слѣдовательно на основаніи ур. (IV) получаемъ

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_1'} &= \frac{1}{-0,431262 F} + \frac{1}{0,00855 \cdot 24,7 \cdot F} \\ &= \frac{1}{F} \left(-\frac{1}{0,431262} + \frac{1}{0,211185} \right). \end{aligned}$$

Пользуясь таблицами логарифмовъ, легко можно найти, что

$$\frac{1}{r_1'} = \frac{1}{F} (-2,3188 + 4,7351) = \frac{1}{F} \cdot 2,4163;$$

поэтому

$$\frac{r_1'}{F} = \frac{1}{2,4163},$$

значить

$$\lg \frac{r_1'}{F'} = -\lg 2,4163 = \bar{1},61685,$$

откуда

$$\frac{r_1'}{F'} = 0,41385;$$

следовательно

$$r_1' = 0,41385 F'.$$

Такимъ образомъ искомыя значенія для радіусовъ выразятся такъ:

$$r_1' = 0,41385 F', r_2' = r_1'' = -0,43126 \cdot F' \text{ и } r_2'' = \infty.$$

Для $F' = 1$ получимъ

$$r_1' = 0,41385, r_2' = r_1'' = -0,43126 \text{ и } r_2'' = \infty \dots (V)$$

А теперь, чтобы получить значенія радіусовъ не для $F' = 1$, а для как. угодно значенія F' , достаточно числа строчки (V) помножить на численное значеніе F' .

Напр. для $F' = 10$ сантим. получимъ что $r_1' = 4,1385$ сантиметр., $r_2' = r_1'' = -4,3126$ сантим. и $r_2'' = \infty$.

Въ § 42 мы вывели заключеніе, что для ахроматизаціи системы, состоящей изъ двухъ идеальныхъ соприкасающихся линзъ, необходимо условіе:

$$\frac{F'_D}{F''_D} = -\frac{\nu''}{\nu'} \dots \dots \dots (80)$$

и какъ слѣдствіе этого условія, получились ур. (82). Надо замѣтить, что изслѣдованія Фраунгофера показавш, что ради устранения сферической аберраціи для самыхъ яркихъ лучей (желтыхъ) приходится

при вычисленіи отношенія $\frac{F'_D}{F''_D}$ нѣсколько отступить отъ формулы (80)

и именно отношеніе $\frac{F'_D}{F''_D}$ брать равнымъ не $-\frac{\nu''}{\nu'}$, а $-\frac{\nu''}{\nu'} (1,012)$.

Въ виду послѣдняго замѣчанія можно показать, что изъ тѣхъ же стеколъ Cr. 0.60 и Fl. 0.93 есть возможность приготовить еще болѣе простой объективъ, который особенно легко изготовить начинающимъ заниматься шлифовкой и полировкой оптическихъ стеколъ. Для означенныхъ стеколъ получимъ:

$$\frac{F'_D}{F''_D} = -\frac{\nu''}{\nu'} (1,012) = -0,59883.$$

Докажемъ, что это условіе будетъ въ достаточной степени соблюдено, если въ объективѣ первая собирающая линза (фиг. 72)

будет сделана изъ кронгласа 0.60, а вторая—разсѣивательная—изъ флинтгласа 0.93 и если все радиусы по абсолютной величинѣ будутъ одинаковы, кромѣ послѣдняго r_2'' , который по прежнему долженъ быть принятъ равнымъ ∞ . Въ самомъ дѣлѣ предположимъ, что $r_2'' = \infty$ и что $r_1' = -r_2' = -r_1'' = r$, гдѣ r абсолютная величина первыхъ трехъ радиусовъ. Тогда на основаніи формулы (63) — § 31 находимъ, что

$$\frac{1}{F'_D} = (n'_D - 1) \left(\frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'} \right) = (n'_D - 1) \frac{2}{r}$$

и

$$\frac{1}{F''_D} = (n''_D - 1) \left(\frac{1}{r_1''} - \frac{1}{\infty} \right) = -(n''_D - 1) \frac{1}{r},$$

откуда

$$\frac{F'_D}{F''_D} = \frac{r \cdot (n''_D - 1)}{2r \cdot (n'_D - 1)} = \frac{n''_D - 1}{2(n'_D - 1)} = \frac{0,6243}{2,0,5173} = -0,6034.$$

Послѣднее число по абс. величинѣ отличается отъ полученнаго выше—0,59883 менѣе, чѣмъ на 0,005. Значитъ съ приближеніемъ до 0,005 можно принять, что для нашего объектива дѣйствительно соблюдается условіе:

$$\frac{F'_D}{F''_D} = -\frac{v''}{v'} (1,012).$$

Теперь вычислимъ абсолютную величину первыхъ трехъ радиусовъ, т. е. r . Принимая соответственно F'_D и F''_D за фокусныя расстоянія собирающей и разсѣивательной линзъ, а F за фокусное расстояние объектива, мы на основаніи формулы (66) § 33 можемъ написать

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F'_D} + \frac{1}{F''_D}.$$

или

$$\frac{1}{F} = (n'_D - 1) \frac{2}{r} - (n''_D - 1) \frac{1}{r} = \frac{1}{r} [2(n'_D - 1) - (n''_D - 1)];$$

слѣдовательно

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{r} (2,0,5173 - 0,6243)$$

или

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{r} \cdot 0,4103,$$

откуда

$$r = 0,4103 \cdot F.$$

Если объективъ предназначенъ для большихъ телескоповъ и диаметръ отверстія объектива значителенъ, то къ такому объективу предъявляются особенныя требованія и поэтому вычисленіе его гораздо труднѣе тѣхъ вычисленій, которыя только что изложены. Но и въ этомъ случаѣ исходнымъ пунктомъ являются формулы (82) или (I) и (II), написанныя въ началѣ этого параграфа. Предполагая значенія F , $n'_F, n''_F, n'_G, n''_G, v'$ и v'' заданными, мы по прежнему можемъ сказать, что формулы (82) или (I) и (II) представляютъ два уравненія съ четырьмя неизвѣстными: r_1', r_2', r_1'' и r_2'' , гдѣ r_1' и r_2' первый и второй радиусы первой линзы, а r_1'' и r_2'' — первый и второй радиусы второй линзы. Значить, два радиуса можно было бы выбрать произвольно, а остальные два нашлись бы изъ означенной пары уравненій и для составленія ахроматическаго объектива съ заданнымъ фокуснымъ разстояніемъ F изъ данныхъ двухъ стеколъ (кронгласа и флинтгласа) можно было бы имѣть безчисленное число комбинацій. Но если желаютъ, чтобы вычисляемый объективъ обладалъ по возможности лучшими качествами, то радиусы выбираютъ не какъ нибудь, а такъ, чтобы не только достигалась ахроматизація, но и чтобы вмѣстѣ съ тѣмъ соблюдались еще нѣкоторыя условія. Первое изъ такихъ условій состоитъ въ томъ, чтобы была устранена сферическая абберрація по всѣмъ зонамъ для лучей D , самыхъ яркихъ для глаза, а второе условіе состоитъ или въ томъ, чтобы была уничтожена сферич. абер. по всѣмъ зонамъ не только для лучей D , но и для лучей другого цвѣта,—или въ томъ, чтобы было соблюдено условіе синусовъ для лучей D при отсутствіи сферич. абер. для тѣхъ же лучей D . Вообще стараются выбрать четыре радиуса такъ, чтобы соблюдались для объектива четыре слѣдующихъ условія:

1. опредѣленное значеніе фокуснаго разстоянія F ,
2. отсутствіе хроматической абер. (для двухъ цвѣтовъ C и F),
3. отсутствіе сферич. абер. для лучей D по всѣмъ зонамъ,
4. отсутствіе сферич. абер. еще для какихъ ниб. лучей кромѣ D или соблюденіе условія синусовъ для лучей D .

Въ телескопическихъ объективахъ фраунгоферовскаго типа, въ которыхъ кронгласовая собирательная линза обращена къ предмету, за четвертое условіе принимается соблюденіе условія синусовъ (68 b — § 35) по крайней мѣрѣ для самыхъ яркихъ лучей (около D), чѣмъ достигается отчетливость изображенія даже въ точкахъ внѣ оси. Въ телескопическихъ объективахъ гауссовскаго типа, въ которыхъ къ предмету обращена разсѣивательная флинтгласовая линза, за четвертое условіе принимается отсутствіе сферической абберраціи не только для лучей D , но и для луча другого цвѣта.

Первые приближенные значения радиусов можно определить по тому способу, какой изложенъ въ началѣ этого параграфа на основаніи формулъ (82) или (I) и (II). Но не надо забывать, что означенныя формулы приближительныя. Онѣ выведены, во первыхъ, для центральныхъ лучей, во вторыхъ, онѣ выведены для идеальныхъ линзъ въ предположеніи, что толщина стеколъ безконечно мала. Поэтому послѣ того, какъ на основаніи этихъ формулъ получились первые приближенные значения для радиусовъ, надо, какъ бы для повѣрки полученныхъ результатовъ, произвести вычисленіе хода центральныхъ и нецентральныхъ лучей. Последнее вычисленіе производится на основаніи указаній, изложенныхъ въ §§ 8 и 9. Результаты вычисленій покажутъ, въ какой степени принятыя приближенные значения радиусовъ удовлетворяютъ требуемымъ условіямъ. Затѣмъ слѣдуетъ нѣсколько измѣнять нѣкоторые радиусы и вторично производить вычисленіе. Получивъ результаты вторичнаго вычисленія, нужно хорошо взвѣсить ихъ и замѣтить, какое вліяніе на результаты вызываютъ сдѣланныя измѣненія радиусовъ, чтобы такимъ образомъ легче рассчитать, какъ выгодно измѣнять дальше значения радиусовъ. Въ началѣ подобныхъ вычисленій выгодно измѣнять только радиусы послѣдней линзы, дабы избѣжать вычисленій, начинающихся съ первой линзы, т. е. съ самаго начала. Но вообще въ концѣ концовъ приходится измѣнить всѣ радиусы ради достиженія желаемыхъ результатовъ, удовлетворяющихъ четыремъ выше упомянутымъ условіямъ или по крайней мѣрѣ тремъ первымъ изъ нихъ.

Измѣняя радиусы, надо также наблюдать, чтобы не измѣнялись значительно разности $\frac{1}{r_1'} - \frac{1}{r_2'}$ и $\frac{1}{r_1''} - \frac{1}{r_2''}$, такъ какъ въ противномъ случаѣ можетъ сильно измѣниться значеніе F .

Вообще подобное вычисленіе требуетъ большого терпѣнія и времени. Я знаю это по опыту, потому что мнѣ самому приходилось вычислять объективъ. Фокусное разстояніе этого объектива составляло почти $1\frac{1}{2}$ метра, а діаметръ равнялся 100 миллиметрамъ. Я производилъ вычисленія нѣсколько лѣтъ, пока добился желаемыхъ результатовъ. Правда, вычисленія велись отрывками и въ свободное время. Въ подобныхъ вычисленіяхъ много значитъ навыкъ. Вначалѣ для вычисленія хода одного только луча черезъ весь объективъ, состоящій изъ двухъ линзъ, мнѣ нужно было нѣсколько часовъ, тогда какъ теперь въ теченіи того же времени мнѣ удается вычислить ходъ черезъ весь такой же объективъ трехъ центральныхъ и трехъ нецентральныхъ лучей C , D и F ; при чемъ я считаю выгоднымъ вести вычисленія одновременно для всѣхъ означенныхъ лучей, располагая вычисленія для каждаго луча въ особомъ вертикальномъ столбцѣ. Ниже

помѣщены вычисления лучей, произведенныя мною съ окончательными значеніями радіусовъ, которыя у меня получились послѣ продолжительныхъ пысканій. Взявъ во вниманіе изложенное въ §§ 8 и 9 и просмотрѣвъ внимательно ниже помѣщенную таблицу № I стр. 125, читатель будетъ имѣть возможность составить себѣ понятіе вообще о ходѣ подобныхъ вычисленій.

Уголъ преломленія ψ_k , соответствующій углу паденія φ_k , вычислялся нѣсколько иначе, чѣмъ какъ показано въ § 9, а именно онъ вычислялся по формулѣ

$$n_k' \sin \psi_k = n_k \sin \varphi_k,$$

гдѣ подъ n_k и n_k' понимаются относительные показатели преломленія (относительно воздуха) первой и второй срединъ, разграниченныхъ преломляющею поверхностью k . Эта формула вытекаетъ изъ основнаго равенства (4)—§ 1. Въ самомъ дѣлѣ, раздѣливъ обѣ части равенства (4)—§ 1 на абс. показ. преломленія воздуха n_0 , получимъ:

$$\frac{n_a}{n_0} \sin \alpha = \frac{n_b}{n_0} \sin \beta,$$

гдѣ $\frac{n_a}{n_0}$ и $\frac{n_b}{n_0}$ представлять ничто иное, какъ показ. преломленія относительно воздуха, § 1—(3).

Чертежъ (фиг. 73) изображаетъ въ натуральную величину сѣченіе объектива, а четыре слѣдующихъ чертежа (фиг. а, b, с и d) послѣдовательно изображаютъ въ уменьшенномъ видѣ каждую изъ преломляющихъ поверхностей въ отдаленности*) На тѣхъ же четырехъ чертежахъ указанъ ходъ лучей по отношенію къ соответствующей поверхности. Съ правой стороны около чертежей помѣщены тѣ формулы, по которымъ производится вычисленіе хода нецентральныхъ лучей. Само вычисленіе занимаетъ лѣвую часть нижепомѣщенной таблицы № I. Правая же часть той же таблицы занята вычисленіями центральныхъ лучей. Въ первой вертикальной графѣ указаны номера чертежей, къ которымъ относятся вычисленія. Такъ какъ осевая свѣтящаяся точка предполагается влѣво на безконечно большомъ разстояніи отъ объектива, то падающіе изъ нея на объективъ лучи надо считать параллельными оптической оси. Нецентральные лучи взяты на высотѣ $H = 0,8 R$, гдѣ R радіусъ отверстія объектива.



фиг. 73.

*) Чертежи а, b, с и d составлены безъ сохраненія пропорциональности въ частяхъ, такъ какъ въ этомъ не предвидѣлось особенной надобности.

Такъ какъ диаметръ объектива=100 мм, то $R=50$ мм. и $H=40$ мм. Высота H считается отъ оси по перпендикуляру къ ней.

Элементы, опредѣляющіе объективъ :

Роды стеколъ	n_c	n_D	n_F	$n_F - n_c$	ν
Kalk-Silicat-Crown 0.60	1,51477	1,5173	1,52332	0,00855	60,5
Gewöhnliches Sil.-Flint 0.93	1,61932	1,6243	1,63678	0,01746	35,8

Радиусы:	Толщина стеколъ:	Фокусное расстояние:
$r_1 = + 1113,1$ мм.	$d_1 = 5$ мм.	$F = 1493,4$ мм.
$r_2 = - 440,7$ мм.	$d_2 = 2,1$ мм.	
$r_3 = - 449$ мм.		
$r_4 = - 1481,4$ мм.		

Значекъ мм. замѣняетъ наименованіе „миллиметръ.“

Центральные лучи вычисляются по формулѣ:

$$\frac{1}{s_k'} = \frac{\frac{n_k}{s_k} + \frac{n_k' - n_k}{r_k}}{n_k'} = \frac{N_k}{n_k'} \quad (\text{см. § 8—форм. 24})$$

Такъ какъ передъ первою кронгласовою линзою (фиг. 73)—воздухъ, между линзами — воздухъ и позади послѣдней флинтгласовой линзы тоже воздухъ, то

$$n_1 = n_2' = n_3 = n_4' = 1.$$

Далѣе замѣтимъ, что

$$\begin{aligned} n_1' = n_2 &= \text{показателю преломленія кронгласа,} \\ n_3' = n_4 &= \text{показателю преломленія флинтгласа.} \end{aligned}$$

Предварительныя приготовленія къ вычисленіямъ.

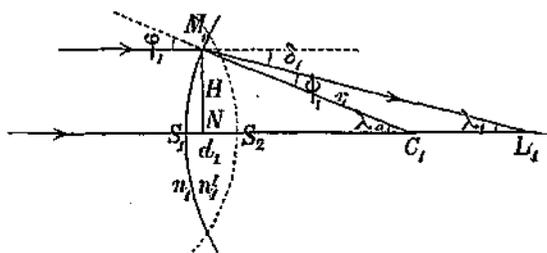
$$\begin{aligned} \lg r_1 &= 3,04653 & - \lg r_1 &= \bar{4},95347 \\ \lg (-r_2) &= 2,64414 & - \lg (-r_2) &= \bar{3},35586 \\ \lg (-r_3) &= 2,65225 & - \lg (-r_3) &= \bar{3},34775 \\ \lg (-r_4) &= 3,17068 & - \lg (-r_4) &= \bar{4},82932 \end{aligned}$$

Crown:

$$\begin{aligned} \lg n_c &= 0,18085 & - \lg n_c &= \bar{1},81965 & \lg (n_c - 1) &= \bar{1},71161 \\ \lg n_D &= 0,18107 & - \lg n_D &= \bar{1},81893 & \lg (n_D - 1) &= \bar{1},71374 \\ \lg n_F &= 0,18279 & - \lg n_F &= \bar{1},81721 & \lg (n_F - 1) &= \bar{1},71877 \end{aligned}$$

Flint:

$$\begin{aligned} \lg n_c &= 0,20934 & - \lg n_c &= \bar{1},79066 & \lg (n_c - 1) &= \bar{1},79191 \\ \lg n_D &= 0,21067 & - \lg n_D &= \bar{1},78933 & \lg (n_D - 1) &= \bar{1},79539 \\ \lg n_F &= 0,21399 & - \lg n_F &= \bar{1},78601 & \lg (n_F - 1) &= \bar{1},80399 \end{aligned}$$



фиг. а.

$$M_1 N = M_1 C_1 \sin \lambda_0$$

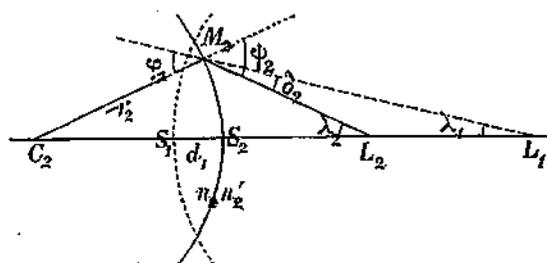
или $H = r_1 \sin \lambda_0$, откуда

$$\sin \lambda_0 = \sin \varphi_1 = \frac{H}{r_1}$$

$$n_1' \sin \psi_1 = n_1 \sin \varphi_1$$

$$\delta_1 = \varphi_1 - \psi_1; \delta_1 = \lambda_1$$

$$\frac{C_1 L_1}{M_1 C_1} = \frac{\sin \psi_1}{\sin \lambda_1}; C_1 L_1 = \frac{r_1 \sin \psi_1}{\sin \lambda_1}$$



фиг. б.

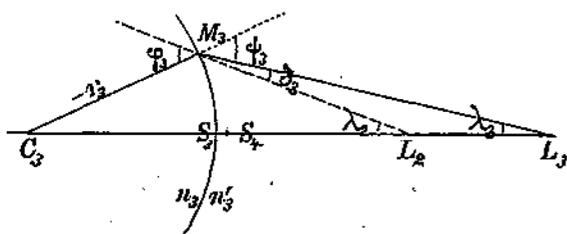
$$\frac{L_1 C_2}{M_2 C_1} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \lambda_1} \text{ или } \frac{L_1 C_2}{-r_2} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \lambda_1}$$

$$n_2' \sin \psi_2 = n_2 \sin \varphi_2$$

$$\delta_2 = \varphi_2 - \psi_2$$

$$\lambda_2 = \delta_2 + \lambda_1$$

$$\frac{L_2 C_2}{M_2 C_2} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \lambda_2} \text{ или } \frac{L_2 C_2}{-r_3} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \lambda_2}$$



фиг. с.

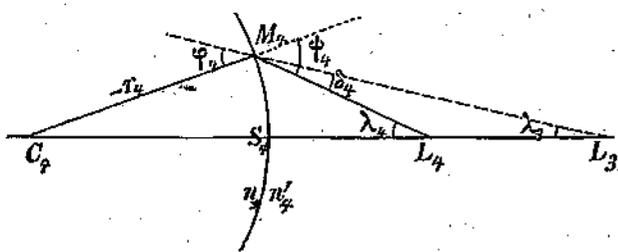
$$\frac{L_2 C_3}{M_3 C_3} = \frac{\sin \varphi_3}{\sin \lambda_2} \text{ или } \frac{L_2 C_3}{-r_3} = \frac{\sin \varphi_3}{\sin \lambda_2}$$

$$n_3' \sin \psi_3 = n_3 \sin \varphi_3$$

$$\delta_3 = \varphi_3 - \psi_3$$

$$\lambda_3 = \lambda_2 - \delta_3$$

$$\frac{L_3 C_3}{M_3 C_3} = \frac{\sin \psi_3}{\sin \lambda_3} \text{ или } \frac{L_3 C_3}{-r_3} = \frac{\sin \psi_3}{\sin \lambda_3}$$



фиг. д.

$$\frac{L_3 C_4}{M_4 C_4} = \frac{\sin \varphi_4}{\sin \lambda_3} \text{ или } \frac{L_3 C_4}{-r_4} = \frac{\sin \varphi_4}{\sin \lambda_3}$$

$$n_4' \sin \psi_4 = n_4 \sin \varphi_4$$

$$\delta_4 = \varphi_4 - \psi_4$$

$$\lambda_4 = \delta_4 + \lambda_3$$

$$\frac{L_4 C_4}{M_4 C_4} = \frac{\sin \psi_4}{\sin \lambda_4} \text{ или } \frac{L_4 C_4}{-r_4} = \frac{\sin \psi_4}{\sin \lambda_4}$$

ТАБЛИЦА № I.

№ черта	Нецентральные лучи			Центральные лучи				
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>		
фиг. а	$\lg H$	1,60206	1,60206	1,60206	$\frac{n_1}{s_1}$	0	0	0
	$-\lg r_1$	4,95347	4,95347	4,95347	$\lg(n_1' - n_1)$	1,71161	1,71374	1,71877
	$\lg \sin \varphi_1$	2,55553	2,55553	2,55553	$-\lg r_1$	4,95347	4,95347	4,95347
	$\lg n_1$	0	0	0	$-\lg n_1'$	1,81965	1,81893	1,81721
	$\lg \sin \varphi_1$	2,55553	2,55553	2,55553	$\lg \frac{1}{s_1'}$	4,48473	4,48614	4,48945
	$-\lg n_1'$	1,81965	1,81893	1,81721	$\lg s_1'$	3,51527	3,51386	3,51055
	$\lg \sin \psi_1$	2,37518	2,37446	2,37274	s_1'	3276,5	3264,8	3240
	φ_1	2°3'34''	2°3'34''	2°3'34''	d_1	5	5	5
	ψ_1	1°21'34''	1°21'25''	1°21'6''	s_2	3270,5	3259,8	3235
	$\delta_1 = \lambda_1$	0°42'	0°42'9''	0°42'28''	$\lg s_2$	3,51461	3,51319	3,50987
	$\lg \sin \lambda_1$	2,08696	2,08849	2,09173	$\lg n_2$	0,18035	0,18107	0,18279
	$\lg \sin \psi_1$	2,37518	2,37446	2,37274	$-\lg s_2$	4,48589	4,48681	4,49013
	$\lg r_1$	3,04653	3,04653	3,04653	$\lg \frac{n_2}{s_2}$	4,66574	4,66788	4,67292
	$-\lg \sin \lambda_1$	1,91304	1,91151	1,90827	$\lg(n_2 - n_2')$	1,71161	1,71374	1,71877
	$\lg C_1 L_1$	3,33475	3,33250	3,32754	$-\lg(-r_2)$	3,35586	3,35536	3,35586
$C_1 L_1$	2161,5	2150,3	2125,9	$\lg \frac{n_2' - n_2}{r_2}$	3,08747	3,06960	3,07463	
r_1	1113,1	1113,1	1113,1	$\frac{n_2' - n_2}{r_2}$	0,00116310	0,00117381	0,0011875	
$S_1 L_1 = s_1'$	3274,6	3263,4	3239	$\lg \sin \varphi_2$	1,01223	1,01245	1,01281	
d_1	5	5	5	$\lg n_2$	0,18035	0,18107	0,18279	
фиг. б	$S_2 L_1 = s_2$	3269,6	3258,4	3234	$-\lg s_2$	4,48589	4,48681	4,49013
	$-r_2$	440,7	440,7	440,7	$\lg \frac{n_2}{s_2}$	4,66574	4,66788	4,67292
	$L_1 C_2$	3710,3	3699,1	3674,7	$\lg(n_2 - n_2')$	1,71161	1,71374	1,71877
	$\lg L_1 C_2$	3,56941	3,56810	3,56522	$-\lg(-r_2)$	3,35586	3,35536	3,35586
	$\lg \sin \lambda_1$	2,08696	2,08849	2,09173	$\lg \frac{n_2' - n_2}{r_2}$	3,08747	3,06960	3,07463
	$-\lg(-r_2)$	3,35586	3,35586	3,35586	$\frac{n_2' - n_2}{r_2}$	0,00116310	0,00117381	0,0011875
	$\lg \sin \varphi_2$	1,01223	1,01245	1,01281	$\frac{n_2}{s_2}$	0,00046317	0,00046548	0,0004709
	$\lg n_2$	0,18035	0,18107	0,18279	$\frac{1}{s_2'}$	0,00163127	0,00163927	0,0016584
	$\lg \sin \varphi_2$	1,01223	1,01245	1,01281	$\lg \frac{1}{s_2'}$	3,21258	3,21465	3,21969
	$\lg \sin \psi_2$	1,19258	1,19352	1,19560	$\lg s_2'$	2,78747	2,78535	2,78031
	ψ_2	3°57'49''	3°58'59''	3°51'36''	$\lg s_2'$	2,78747	2,78535	2,78031
	φ_2	5°54'13''	5°54'24''	5°54'42''	$s_2' = s_3$	613,01	610,03	602,99
	δ_2	3°3'36''	3°4'35''	3°6'54''				
	λ_1	0°42'	0°42'9''	0°42'28''				
	λ_2	3°45'36''	3°40'44''	3°49'22''				
$\sin \lambda_2$	2,81675	2,81893	2,82393					

№ черта	Нецентральные лучи			центральные лучи				
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>		
фиг. с	$\sin \psi_2$	$\overline{1,19258}$	$\overline{1,19352}$	$\overline{1,19560}$				
	$\lg (-r_2)$	$2,64414$	$2,64414$	$2,64414$				
	$-\lg \sin \lambda_2$	$1,18325$	$1,18107$	$1,17607$				
	$\lg L_2 C_2$	$3,01997$	$3,01873$	$3,01581$				
	$L_2 C_2$	$1047,1$	$1044,1$	$1037,1$				
	$-r_2 = C_2 S_2$	$440,7$	$440,7$	$440,7$				
	$S_2 L_2$	$606,4$	$603,4$	$596,4$				
	$-r_3 = C_3 S_3$	449	449	449	$\lg s_3$	$2,78747$	$2,78535$	$2,78031$
	$L_2 C_3$	$1055,4$	$1052,4$	$1045,4$	$\lg n_3$	0	0	0
	$\lg L_2 C_3$	$3,02342$	$3,02218$	$3,01928$	$-\lg e_3$	$\overline{3,21253}$	$\overline{3,21465}$	$\overline{3,21969}$
	$\lg \sin \lambda_2$	$\overline{2,81675}$	$\overline{2,81893}$	$\overline{2,82393}$	$\lg \frac{n_3}{s_3}$	$\overline{3,21253}$	$\overline{3,21465}$	$\overline{3,21969}$
	$-\lg (-r_3)$	$\overline{3,34775}$	$\overline{3,34775}$	$\overline{3,34775}$	$\lg (n_3' - n_3)$	$\overline{1,79191}$	$\overline{1,79539}$	$\overline{1,80399}$
	$\lg \sin \varphi_3$	$\overline{1,18792}$	$\overline{1,18886}$	$\overline{1,19096}$	$-\lg (-r_3)$	$\overline{3,34775}$	$\overline{3,34775}$	$\overline{3,34775}$
	$\lg n_3$	0	0	0	$\lg \frac{n_3' - n_3}{-r_3}$	$\overline{3,18966}$	$\overline{3,14314}$	$\overline{3,15174}$
	$\lg \sin \varphi_3$	$\overline{1,18792}$	$\overline{1,18886}$	$\overline{1,19096}$	$\frac{n_3}{s_3}$	$0,0016318$	$0,0016393$	$0,0016584$
	$-\lg n_3'$	$\overline{1,79066}$	$\overline{1,78938}$	$\overline{1,78601}$	$\frac{n_3' - n_3}{-r_3}$	$0,0013793$	$0,0013904$	$0,0014182$
	$\lg \sin \psi_3$	$\overline{2,97858}$	$\overline{2,97819}$	$\overline{2,97697}$	N_3	$0,0002520$	$0,0002489$	$0,0002402$
	$\varphi_3 =$	$8^{\circ}52'1''$	$8^{\circ}53'11''$	$8^{\circ}55'47''$	$\lg N_3$	$\overline{4,40140}$	$\overline{4,39602}$	$\overline{4,38057}$
	$\psi_3 =$	$5^{\circ}27'44''$	$5^{\circ}27'26''$	$5^{\circ}26'31''$	$-\lg n_3'$	$\overline{1,79066}$	$\overline{1,78993}$	$\overline{1,78601}$
	λ_2	$3^{\circ}45'36''$	$3^{\circ}46'44''$	$3^{\circ}49'22''$	$\lg \frac{N_3}{n_3'}, \lg \frac{1}{s_3'}$	$\overline{4,19206}$	$\overline{4,18535}$	$\overline{4,16658}$
δ_3	$3^{\circ}24'17''$	$3^{\circ}25'45''$	$3^{\circ}29'16''$	$\lg s_3'$	$3,80794$	$3,81465$	$3,83342$	
λ_3	$0^{\circ}21'19''$	$0^{\circ}20'59''$	$0^{\circ}20'6''$	s_3'	6426	6526	$6814,3$	
$\lg \sin \lambda_3$	$\overline{3,79234}$	$\overline{3,78560}$	$\overline{3,76687}$	d_3	$2,1$	$2,1$	$2,1$	
$\lg \sin \psi_3$	$\overline{2,97858}$	$\overline{2,97819}$	$\overline{2,97697}$	s_4	$6423,9$	$6523,9$	$6812,2$	
$\lg (-r_3)$	$2,65225$	$2,65225$	$2,65225$					
$-\lg \sin \lambda_3$	$2,20766$	$2,21440$	$2,23313$					
$\lg L_3 C_3$	$3,88349$	$3,84484$	$3,86235$					
$L_3 C_3$	$6894,3$	$6995,8$	$7283,7$					
$-r_3 = C_3 S_3$	449	449	449					
$S_3 L_3$	$6445,3$	$6546,8$	$6834,7$					
$d_3 = S_3 S_4$	$2,1$	$2,1$	$2,1$					
фиг. d	$S_4 L_4$	$6443,2$	$6544,7$	$6832,6$	$\lg s_4$	$3,80780$	$3,81450$	$3,83328$
	$-r_4 = C_4 S_4$	$1481,4$	$1481,4$	$1481,4$	$\lg n_4$	$0,20934$	$0,21067$	$0,21399$
	$L_3 C_4$	$7924,6$	$8026,1$	$8314,0$	$-\lg s_4$	$\overline{4,19220}$	$\overline{4,18550}$	$\overline{4,16672}$
	$\lg L_3 C_4$	$3,89398$	$3,90450$	$3,91981$	$\lg \frac{n_4}{s_4}$	$\overline{4,40154}$	$\overline{4,39617}$	$\overline{4,38071}$
	$\lg \sin \lambda_3$	$\overline{3,79234}$	$\overline{3,78560}$	$\overline{3,76687}$	$\lg (n_4' - n_4')$	$\overline{1,79191}$	$\overline{1,79539}$	$\overline{1,80399}$
	$-\lg (-r_4)$	$\overline{4,82932}$	$\overline{4,82932}$	$\overline{4,82932}$	$-\lg (-r_4)$	$\overline{4,82932}$	$\overline{4,82932}$	$\overline{4,82932}$
	$\lg \sin \varphi_4$	$\overline{2,52064}$	$\overline{2,51942}$	$\overline{2,51600}$	$\lg \frac{n_4' - n_4}{r_4}$	$\overline{4,62123}$	$\overline{4,62471}$	$\overline{4,63381}$

№ чертежа	Нецентральные лучи			центральные лучи				
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>		
фиг. d	$\lg n_1$	0,20934	0,21067	0,21399	$\frac{n_1}{s_1}$	0,00025208	0,00024898	0,00024028
	$\lg \sin \varphi_1$	$\overline{2,52064}$	$\overline{2,51942}$	$\overline{2,51600}$	$\frac{n_1' - n_1}{r_1}$	0,00041805	0,00042142	0,00042984
	$\lg \sin \psi_1$	$\overline{2,72998}$	$\overline{2,73009}$	$\overline{2,72999}$	$\frac{1}{s_1'}$	0,00067013	0,00067040	0,00067012
	ψ_1	3°4'42"	3°4'45"	3°4'42"	$\lg \frac{1}{s_1'}$	$\overline{4,82616}$	$\overline{4,82633}$	$\overline{4,82615}$
	φ_1	1°54'1"	1°53'43"	1°52'49"				
	δ_1	1°10'41"	1°11'2"	1°11'53"	$\lg s_1'$	3,17384	3,17367	3,17385
	λ_2	0°21'19"	0°20'59"	0°20'6"				
	λ_1	1°32'	1°32'1"	1°31'59"	s_1'	1492,2	1491,7	1492,3
	$\lg \sin \lambda_1$	$\overline{2,42746}$	$\overline{2,42754}$	$\overline{2,42738}$				
	$\lg \sin \psi_1$	$\overline{2,72998}$	$\overline{2,73009}$	$\overline{2,72999}$				
	$\lg (-r_1)$	3,17068	3,17068	3,17068				
	$-\lg \sin \lambda_1$	1,57254	1,57246	1,57262				
	$\lg C_1 L_1$	3,47320	3,47323	3,47329				
	$C_1 L_1$	2973,1	2973,3	2973,7				
$-r_1 = C_1 S_1$	1481,4	1481,4	1481,4					
$S_1 L_1$	1491,7	1491,9	1492,3					

Эта таблица даёт такие окончательные результаты:

	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>
для крайних лучей $S_1 L_1 = s_1'$	1491,7	1491,9	1492,3
для центральных лучей s_1'	1492,2	1491,7	1492,3

Такимъ образомъ въ вычисленномъ мною объективѣ точки схождения всѣхъ лучей *C*, *D* и *F*, какъ центральныхъ, такъ и нецентральныхъ отстоятъ отъ объектива (отъ вершины S_1) почти на одномъ и томъ же разстояніи 1492 мм.

Для фокуснаго разстоянія, вычисленнаго по формулѣ:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F'} + \frac{1}{F''},$$

получается такое значеніе:

$$F = 1493,4 \text{ мм.}$$

Не слѣдуетъ смѣшивать фокуснаго разстоянія *F* съ отрѣзкомъ $S_1 L_1 = s_1'$: фокусное разстояніе считается отъ фокуса до главной точки, а s_1' — отъ задней поверхности объектива до L_1 вдоль оси.

Полученные результаты показываютъ, что означенный объективъ при диаметрѣ 80 мм. въ отверстіи удовлетворяетъ слѣдующимъ условіямъ:

- 1) онъ обладаетъ фокуснымъ разстояніемъ $F=1498,4$ мм.
- 2) въ немъ почти совсѣмъ устранена хроматич. аберрація,
- 3) „ устранена сферич. аберрація для лучей D ,
- 4) „ устранена сферич. аберрація для лучей C и F .

Я принялъ діаметръ отверстія равнымъ 104 мм. и на самомъ дѣлѣ приготовилъ такой объективъ. Стекла были выписаны отъ Шотта изъ Иены*). Забѣчу, что изготовленіе этого объектива заняло у меня очень много времени. Стекла порешлифовывались мною много разъ. Главное затрудненіе я встрѣтилъ въ центрировкѣ линзъ и въ томъ, что стекла, будучи очень тонкими, при обработкѣ гнулись, а если линза такихъ размѣровъ согнется самымъ незамѣтнымъ образомъ, на толщину волоска, она уже замѣтно теряетъ свои достоинства. Какъ были преодолены означенныя затрудненія, будетъ сказано въ статьѣ, подъ заглавіемъ: „Оптическая техника“, а теперь только замѣчу еще, что приготовленный мною телескопъ съ этимъ объективомъ даетъ возможность отчетливо видѣть горы и кратеры на лунѣ, также даетъ возможность видѣть фазы венера, спутниковъ юпитера; на юпитерѣ при хорошемъ состояніи атмосферы можно замѣтить поперечную полосу; обыкновенный шрифтъ можно читать на разстояніи 50 метровъ.

Ниже приведены данныя для конструкціи объектива Льюмера (гауссовскаго типа—флинтгласъ обращенъ къ предмету):

Роды стеколъ:

фабр. №	n_C	n_D	n_F	n_G
0. 102	1,64373	1,64920	1,66294	1,67475
S. 41	1,55284	1,55531	1,56113	1,56576

Радиусы:	Толщина линзъ:	Разстояніе линзъ:
$r_1 = -93,27$	Flint. 3,6129	0,9032
$r_2 = -140,24$	Crown. 5,4193	
$r_3 = +1212,69$		
$r_4 = -141,42$		

Діаметръ отверстія объектива 50.

Разстояніе фокуса отъ послѣдней поверхности 460,5.

*) Iena. Glasschmelzerei. Schott & Gen.

Протяженія выражены въ миллиметрахъ.

Стекло 0.102 — Flint, а *S.* 41 — Crown.

§ 49. **Объективы для микроскоповъ.** Вычисленіе объектива для микроскопа вообще гораздо труднѣе, чѣмъ вычисленіе объектива для телескопа. Это происходитъ уже по той причинѣ, что въ первомъ объективѣ обыкновенно преломляющихъ поверхностей больше, чѣмъ въ послѣднемъ. Но большее число преломляющихъ поверхностей еще не составляетъ главной причины трудности вычисленія микроскопическихъ объективовъ. Главная причина этой трудности въ томъ, что такъ называемое угловое отверстие *ALB* (фиг. 74) объектива для микроскопа велико и всякій крайній лучъ, какъ напр. *LA*, выходящій изъ осевой точки предмета *L*, образуетъ значительный уголъ наклоненія *u*.



фиг. 74.

Въ объективѣ телескопа имѣетъ мѣсто другое обстоятельство, а именно: такъ какъ діаметръ телескопическаго объектива въ сравненіи съ фокуснымъ разстояніемъ его очень малъ, то крайніе лучи, исходящіе изъ осевой точки весьма отдаленнаго предмета, даже по выходѣ изъ объектива образуютъ незначительные углы наклоненія *u'* (фиг. 75), вслѣдствіе чего ходъ упомянутыхъ крайнихъ лучей не слишкомъ отстаетъ отъ хода центральныхъ лучей, исходящихъ изъ той же осевой точки, и пользуясь формулой (82), какъ исходнымъ пунктомъ при вычисленіи телескопическаго объектива, мы можемъ сладить въ концѣ концовъ и съ крайними лучами, заставивъ ихъ пересѣкаться, по выходѣ изъ объектива, почти въ той же точкѣ, въ которой пересѣкаются центральные лучи и этимъ можемъ уже устранить аберрацію. Объ этомъ уже говорилось въ § 48.

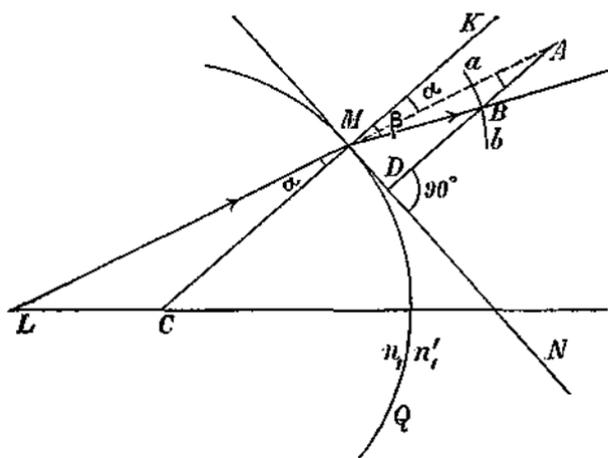


фиг. 75.

Но при вычисленіи микроскопическаго объектива формулы (82) теряютъ свое значеніе, потому что вслѣдствіе значительнаго углового отверстия микроскопическаго объектива крайніе лучи могутъ значительно отступать отъ центральныхъ, и сладивъ съ центральными лучами, мы можемъ очутиться въ большомъ затрудненіи относительно крайнихъ лучей въ томъ именно смыслѣ, что напр. въ то время, какъ для центральныхъ лучей хроматическая аберрація будетъ

уничтожена, для крайних лучей она может оказаться весьма значительною, а когда для крайних лучей та же абберация будет уничтожена, то может статься, что для центральных лучей она будет значительною (фиг. 70 и 71). Надо при этом замѣтить, что въ микроскопическомъ объективѣ крайніе лучи играютъ весьма важную роль и при вычисленіи его слѣдуетъ особенное вниманіе обращать на крайніе лучи.

Въ виду той трудности, какую представляетъ вычисленіе объектива микроскопа, приступая къ вычисленію такого объектива, полезно первыи изысканія произвести при помощи черченія. Дѣло въ томъ, что направленіе преломленнаго луча можно опредѣлить не только вычисленіемъ, но и черченіемъ. Покажемъ это.



фиг. 76.

Предположимъ, что на преломляющую поверхность MQ (фиг. 76) падаетъ лучъ LM и намъ нужно опредѣлить направленіе соответствующаго ему преломленнаго луча. Отложимъ по нѣкоторому масштабу на продолженіи прямой LM отръзокъ MA равный численно n_1 , гдѣ n_1 показатель преломленія первой (лѣвой)

средины. Опустимъ изъ точки A перпендикуляръ AD на касательную MN и изъ точки M опишемъ дугу ab радиусомъ MB численно равнымъ n_1' , гдѣ n_1' — показатель преломленія второй (правой) средины. Прямая MB , проходящая черезъ точку M и точку пересеченія B дуги ab съ упомянутымъ перпендикулярномъ AD , представляетъ положеніе преломленнаго луча. Въ самомъ дѣлѣ, изъ чертежа непосредственно слѣдуетъ, что

$$MD = MB \sin MBD$$

и

$$MD = MA \sin MAD;$$

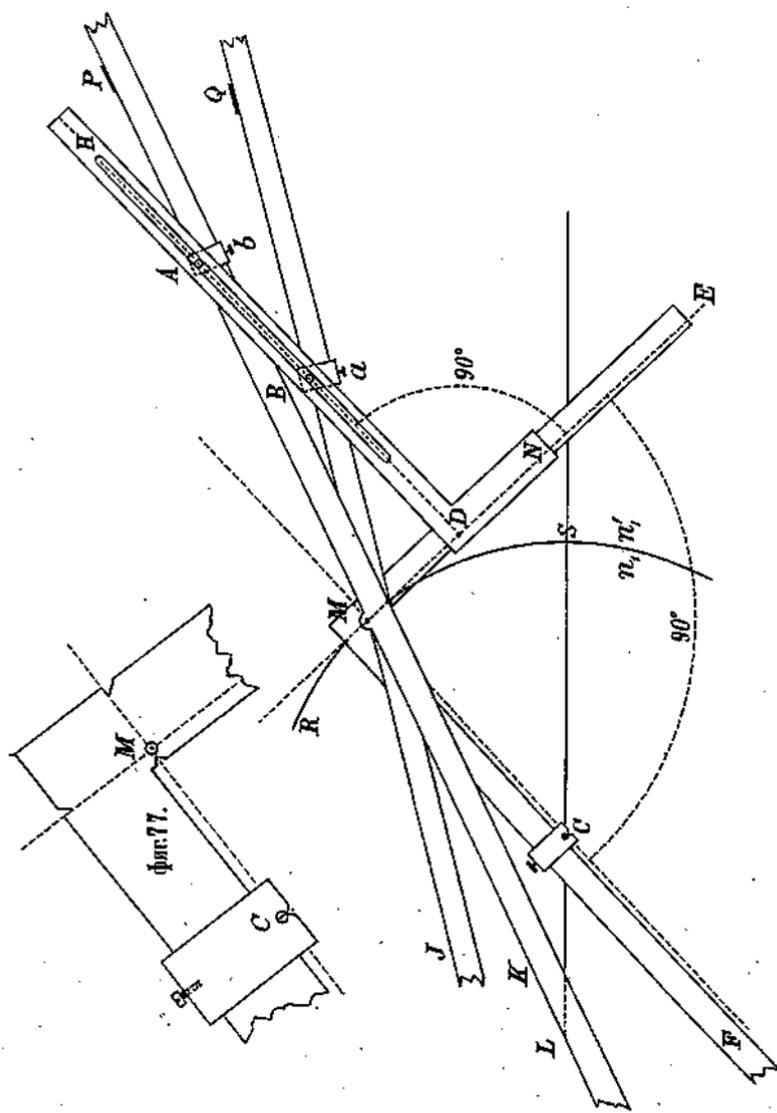
слѣдовательно

$$MA \sin MAD = MB \sin MBD \dots \dots \dots (a)$$

Но численно $MB = n_1'$ и $MA = n_1$, кромѣ того, такъ какъ $MC \parallel AD$, то $\angle MAD = \angle LMC = \alpha$ и $\angle MBD = \angle KMB = \beta$; поэтому равенство (a) замѣнится такимъ:

$$n_1 \sin \alpha = n_1' \sin \beta .$$

Отсюда слѣдуетъ что, уголъ β представляетъ ничто иное, какъ уголъ преломленія, соответствующій углу паденія α (§ 1), а прямая MB есть путь преломленного луча.



фиг. 78.

Такое же разсужденіе относится и къ случаю, когда преломляющая поверхность есть плоскость. Тогда слѣдь преломляющей поверхности изобразился бы на бумагѣ прямою MN (фиг. 76), а радиусъ SM замѣнился бы перпендикуляромъ паденія въ точку M .

Чтобы упростить опредѣленіе преломленнаго луча черченіемъ, я придумалъ приборъ, состоящій въ слѣдующемъ. Двѣ пластинки *ME* и *MF* (фиг. 78) спаяны подъ прямымъ угломъ, образуя наугольникъ *EMF*. Въ точкѣ *M* завинченъ стальной цилиндрической стержень, оканчивающійся внизу остриемъ, какъ конецъ иглокп. На этотъ наугольникъ *EMF* кладутся двѣ пластинки *JQ* и *KP* такъ, чтобы стержень *M* проходилъ черезъ соответствующія отверстія, сдѣланныя въ каждой изъ пластинокъ *JQ* и *KP*. Такимъ образомъ пластинки *JQ* и *KP* могутъ вращаться около точки *M*. На каждой изъ двухъ послѣднихъ пластинокъ находится плоская муфта: на одной пластинкѣ—муфта *A*, на другой—муфта *B*. Эти муфты могутъ быть закрѣплены на произвольномъ разстояніи отъ стержня *M* при помощи крошечныхъ винтиковъ *a* и *b*. Въ каждой изъ муфтъ закрѣпленъ стальной тонкій стержень, попадающій въ щель пластинки *HD*. Пластика *HD*, благодаря сѣдлу *DN*, способна перемѣщаться вдоль *ME*, оставаясь всегда параллельною пластинкѣ *FM* и слѣдовательно перпендикулярною къ пластинкѣ *ME*. На пластинкѣ *FM* тоже находится плоская муфта, въ которую завинченъ винтъ *C*, оканчивающійся остриемъ, выходящимъ изъ муфты наружу внизъ. Всѣ пластинки, изъ которыхъ сдѣланъ приборъ, приготовлены изъ стальной пружины толщиною въ 0,6 миллиметра и шириною въ 12 миллиметровъ. Примѣненіе описаннаго прибора будетъ понятно, если обратить вниманіе на то, что верхніе края пластинокъ *MP* и *MQ* (фиг. 78) играютъ такую же роль, какую играли на чертежѣ (фиг. 76) прямыя *MA* и *MB*, а перпендикуляръ *AD* къ прямой *MN* на чертежѣ (фиг. 76) замѣняется на чертежѣ (фиг. 78) линіей *HD*, проходящею по серединѣ щели пластинки *HD* и перпендикулярною къ линіи *ME*.

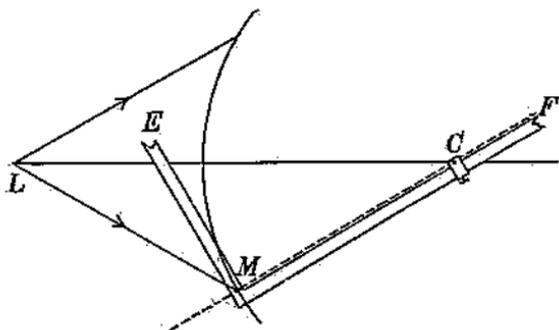
Можемъ, яче мы можемъ при помощи описаннаго прибора опредѣлить, какъ направится послѣ преломленія лучъ *LM* (фиг. 78), падающій на преломляющую поверхность *RS*, которой центръ въ точкѣ *C*, при чемъ показатель преломленія первой среды $n_1 = 1,52$, а второй $n_2 = 1$. Закрѣпимъ муфты *A* и *B* такъ, чтобы разстояніе *MA* = 1,52 (дециметра), а *MB* = 1 (дециметру). Затѣмъ муфту *C* закрѣпимъ въ такомъ мѣстѣ, чтобы разстояніе между остриемъ винта *C* и остриемъ стержня *M* равнялось радіусу *CM* преломляющей поверхности *RS*. Потомъ расположимъ наугольникъ *FME* такъ, чтобы острие винта *C* попало въ центръ преломляющей поверхности *RS*, тогда острие стержня *M* попадетъ въ нѣкоторую точку дуги *RS*. Поворачивая наугольникъ *FME* около *C*, можно заставить это острие стержня *M* расположиться надъ точкою паденія луча. Достигнувъ этого, нажимаемъ слегка на стержень *M* и этимъ заставляемъ наугольникъ расположиться вдоль радіуса *CM*. Замѣтимъ, что острие

винта C несколько больше выдается вниз, чѣм остріе стержня M . Этимъ облегчается вращеніе наугольничка около точки C . Расположивъ наугольничекъ, какъ описано, прижимаемъ его къ бумагѣ и двигаемъ сѣдло DN вдоль пластинки ME въ ту или другую сторону, пока верхній край линейки KP , проходящій всегда черезъ точку M , не совпадетъ съ падающимъ лучемъ LM . Въ этотъ моментъ верхній край линейки JQ представитъ направленіе преломленнаго луча. Это слѣдуетъ изъ сказаннаго по поводу чертежа (фиг. 76). Чтобы обозначить на бумагѣ направленіе преломленнаго луча MQ , нѣтъ надобности вести черту пишущимъ приборомъ (карандашемъ) вдоль всей линіи MQ , такъ какъ это даже невозможно, а слѣдуетъ поступать такъ. Надо прижать къ бумагѣ одинъ только конецъ этой линейки, напримѣръ въ томъ мѣстѣ, гдѣ поставлена буква Q и тамъ сдѣлать на бумагѣ короткую черту вдоль верхняго края линейки MQ , затѣмъ, сдвинувъ весь приборъ въ сторону, слѣдуетъ при помощи особой линейки провести пишущимъ приборомъ прямую черезъ отмѣченную черту Q и слѣдъ, оставленный на бумагѣ остриемъ стержня M .

Я обыкновенно намѣчалъ на дугѣ RS нѣсколько такихъ точекъ, какъ M , обозначая ихъ буквами $M_1, M_2, M_3 \dots$ и затѣмъ, невыпнмая острія C изъ центра дуги RS , отмѣчалъ черты $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$, соответственно точкамъ $M_1, M_2, M_3 \dots$; потомъ оставалось снять совсѣмъ приборъ съ бумаги и провести на ней карандашемъ прямыя $M_1 Q_1, M_2 Q_2, M_3 Q_3$ и т. д.

Такимъ образомъ въ короткій промежутокъ времени можно опредѣлить много преломленныхъ лучей. Чтобы удобнѣе было наблюдать за остриемъ винта C и стержня M , около нихъ выпилены выемки (фиг. 77 надъ фиг. 78). Онѣ внизу углубляются до самихъ отверстій, въ которыя завинчены винтъ C и стержень M .

Чтобы легче ориентироваться при установкѣ наугольничка въ случаѣ, когда преломляющая поверхность не сферическая, а плоская, на пластинкѣ ME (фиг. 78) сдѣлана черта, обозначенная на чертѣжѣ



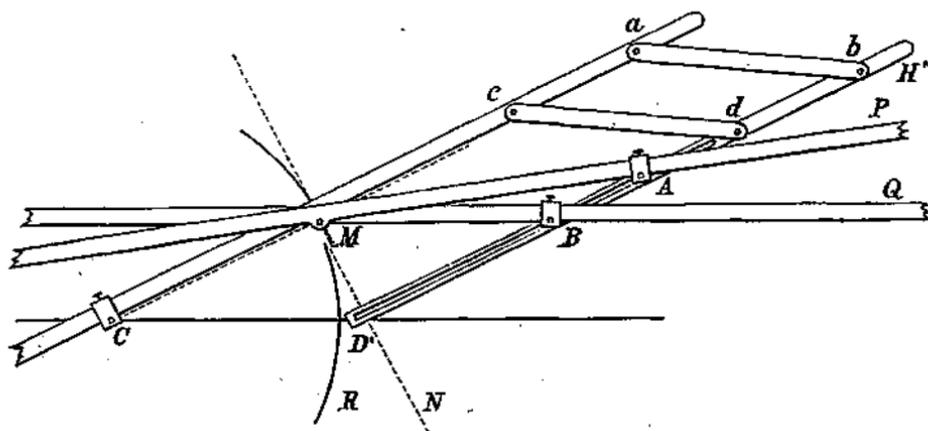
фиг. 79.

пунктирною линією ME . Въ случаѣ плоской преломляющей поверхности, эту линію надо расположить вдоль слѣда преломляющей плоскости.

Если бы центр преломляющей поверхности находился вправо от нея (фиг. 79), то въ такомъ случаѣ слѣдовало бы взять во вниманіе лучи, расположенные подъ осью и самъ наугодыльникъ пришлось бы расположить, какъ показало на чертежѣ (фиг. 79).

Наконецъ, замѣтимъ, что пластинки JQ и KP (фиг. 78) можно направлять не щелью пластинки HD , а краемъ ея AB . Такъ поступать приходится по необходимости въ томъ случаѣ, если лучъ образуется съ перпендикуляромъ паденія малый уголъ.

Я имѣлъ въ мысли и другой проектъ, сущность котораго можно видѣть на чертежѣ (фиг. 80). Предположимъ, что двѣ пластинки ab и cd соединены шарнирами съ пластинками CM и $D'H'$, при чемъ $ab = cd$ и $ac = bd$. Очевидно, что при такихъ условіяхъ была бы возможность придвигать линейку $D'H'$ къ линейкѣ CM или отодвигать отъ послѣдней (конечно въ извѣстныхъ предѣлахъ). Но при такомъ передвиженіи линейки $H'D'$ она всегда оставалась бы параллельною линейкѣ CM , а слѣдовательно перпендикулярною къ линіи MN , которая проведена перпендикулярно къ MC и представляетъ касательную къ дугѣ MR въ точкѣ M . Въ данномъ случаѣ пластинка $H'D'$ исполняла бы роль пластинки HD , изображенной на чертежѣ (фиг. 78).



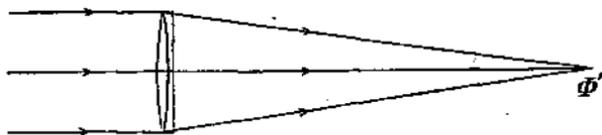
фиг. 80.

Но первый проектъ мнѣ показался болѣе удобнымъ и я дѣйствительно приготовилъ по нему приборъ (фиг. 78) и остался имъ вполне довольнымъ.

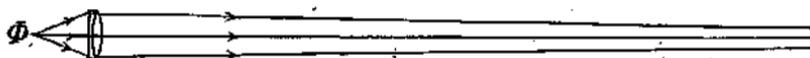
Къ построению прибѣгаютъ, когда желаютъ найти хоть приближенныя значенія радиусовъ тѣхъ преломляющихъ поверхностей, которыми должны быть ограничены линзы проектируемаго объектива для микроскопа. Но черченіе примѣняется и въ другихъ случаяхъ, напр. когда желаютъ построить окуляръ или опредѣлить нѣкоторые его эле-

менты. Когда применяют черчение, поступают следующим образом. По масштабу чертят на бумаге проектируемый объективъ въ несравненно большемъ размѣрѣ, чѣмъ въ какомъ онъ предполагается въ дѣйствительности, напр. въ 10 разъ больше натуральной величины; затѣмъ выбираютъ нѣкоторые лучи и черченіемъ опредѣляютъ ихъ ходъ. Конечно, работа производится на обширномъ, ровномъ столѣ. Бумага должна быть тоже обширною и иногда по мѣрѣ надобности приходится приклеивать новые листы. Мѣняя радиусы и стекла въ проектируемомъ объективѣ и опредѣляя каждый разъ ходъ лучей, можно уже однимъ черченіемъ подыскать выгодную комбинацію, которую потомъ слѣдуетъ проверять и совершенствовать вычисленіемъ.

Не мѣшаетъ замѣтить, что дѣйствіе объектива микроскопа обратное дѣйствію объектива телескопа въ томъ смыслѣ, что объективъ телескопа обращаетъ пучекъ почти параллельныхъ лучей въ конусъ лучей, сходящихся почти въ фокусѣ объектива (фиг. 81), тогда какъ объективъ микроскопа обращаетъ конусъ лучей, выходящихъ почти



фиг. 81.



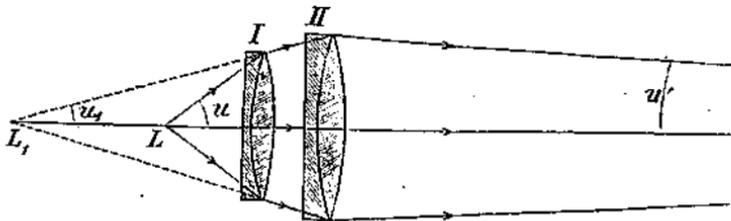
фиг. 82.

изъ фокуса, въ пучекъ почти параллельныхъ лучей (фиг. 82). Объясняется это тѣмъ, что черезъ телескопъ разсматривается предметъ чрезвычайно отдаленный, посылающій въ объективъ телескопа почти параллельные лучи и слѣдовательно собирающіеся по выходѣ изъ объектива почти въ фокусной плоскости его; а въ микроскопахъ наоборотъ — предметъ находится почти въ фокусѣ объектива; поэтому лучи по выходѣ изъ объектива почти параллельные.

Вотъ почему въ прежнее время объективъ микроскопа составлялъ ахроматическую линзу, вычисленную по тому же принципу, что и ахроматическій объективъ телескопа, но только эта линза въ микроскопѣ должна была быть повернутою къ предмету обратно сравнительно съ положеніемъ ея въ телескопѣ. Чертежи (фиг. 81 и 82) поясняютъ сказанное. Фигура 81 представляетъ положеніе ахроматической линзы въ телескопѣ по отношенію къ падающимъ отъ весь-

ма отдаленнаго предмета лучамъ, а фигура 82 представляетъ расположение ахроматическаго объектива въ микроскопѣ по отношенію къ лучамъ, исходящимъ почти изъ фокуса.

Желая захватить въ объективъ микроскопа болѣе широкій пучекъ лучей и сдѣлать фокусное разстояніе объектива покороче, прибѣгли къ принципу, предложенному Селлигомъ (Selligie). По этому принципу соединяли двѣ или нѣсколько ахроматическихъ линзъ, располагая ихъ одну за другою по опредѣленному закону, а именно такъ. Предположимъ, что въ составъ микроскопическаго объектива



фиг. 83.

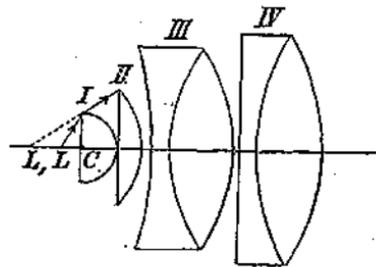
входятъ только двѣ ахроматическія линзы (фиг. 83). Первая линза I имѣетъ двѣ сопряженныя апланатическія точки L и L_1 , значить, лучи, выходящіе изъ точки L , пройдя черезъ линзу I , направляются такъ, что кажутся исходящими изъ точки L_1 . Точка L_1 въ свою очередь есть одна изъ двухъ апланатическихъ точекъ, принадлежащихъ линзѣ II , и лучи, направляющіеся, какъ бы изъ точки L_1 и падая на линзу II , по выходѣ изъ нея собираются въ нѣкоторой точкѣ вправо отъ всей системы и не обозначенной на чертежѣ. Эта послѣдняя точка вмѣстѣ съ точкою L_1 и представляетъ пару апланатическихъ сопряженныхъ точекъ по отношенію къ линзѣ II .

Вообще сущность этого принципа состоитъ въ томъ, что, сколько бы ни было ахроматическихъ линзъ, входящихъ въ составъ объектива и расположенныхъ одна за другою, каждая изъ нихъ обладаетъ двумя сопряженными апланатическими точками, при чемъ вторая апланатическая точка любой линзы есть вмѣстѣ съ тѣмъ первая апланатическая точка слѣдующей линзы, а пучекъ лучей, выйдя изъ нѣкоторой точки предмета и проходя послѣдовательно черезъ линзы, остается расходящимся, хотя его расходимость уменьшается каждою слѣдующею линзою и наконецъ послѣдняя линза обращаетъ его въ сходящійся пучекъ.

Теперь этотъ принципъ оставленъ, такъ какъ онъ еще не даетъ возможности значительно поднять качества объектива для микроскопа. Теперь строятъ объективы для микроскопа по другому принципу

(принципъ Амиши), благодаря которому удалось значительно возвысить качества объектива для микроскопа, какъ въ отношеніи увеличенія, такъ и въ отношеніи способности разрѣшать тонкія структуры разсматриваемыхъ предметовъ. Основаніемъ этого принципа служить то обстоятельство, что каждая сферическая преломляющая поверхность имѣетъ двѣ апланатическія точки (§ 35), разстоянія которыхъ отъ центра сферич. поверхности опредѣляются соответственно выраженіями $\frac{n'}{n}r$ и $\frac{n}{n'}r$, гдѣ n и n' показатели преломленія средъ, разграничиваемыхъ сферическою поверхностью, а r — радиусъ ея.

Чертежъ (фиг. 84) представляетъ систему, построенную по этому принципу, увеличенную приблизительно въ 5 разъ. При этомъ предполагается, что эта система иммерсионная, т. е. въ ней пространство между предметомъ и первую линзою I заполнено жидкостью. Мы будемъ думать, что показатель преломленія этой жидкости одинаковъ съ показателемъ преломленія линзы I . Линза I представляетъ собою почти полушаріе, обращенное плоскою поверхностью къ предмету. Оно готовится по большей части изъ обыкновеннаго кронгласа, котораго показатель преломленія 1,52. Въ такомъ случаѣ жидкостью, которая заполняетъ пространство между предметомъ и линзою I , можетъ служить кедровое масло, такъ какъ показатель преломленія кедроваго масла тоже 1,52.



фиг. 84.

Поэтому въ отношеніи оптическаго дѣйствія выходитъ такъ, какъ если бы предметъ находился въ томъ же веществѣ, изъ котораго сдѣлана линза I . Предметъ помещается въ первой апланатической точкѣ L полушарія (линзы) I . Эта точка L , какъ извѣстно (§ 35), отстоитъ отъ центра C полушарія I на разстояніи $\frac{n'}{n}r = \frac{r}{1,52}$, гдѣ r радиусъ полушарія. Поэтому лучи, исходящіе изъ точки L , идутъ, не преломляясь, до шаровой поверхности линзы I , тутъ въ первый разъ преломляются и идутъ дальше, какъ бы исходя изъ точки L_1 , которая представляетъ другую апланатическую точку полушарія I и отстоитъ отъ того же центра C на разстояніи $\frac{n}{n'}r = 1,52r$.

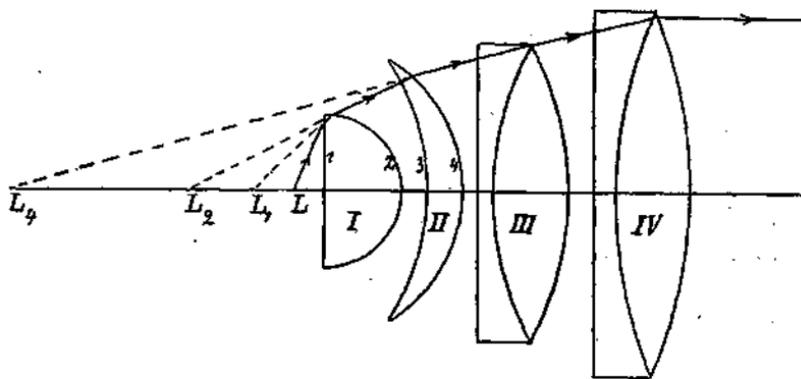
Вспомнивъ свойство означенныхъ апланатическихъ точекъ, скажемъ, что широкій коническій пучекъ лучей, первоначально исходящій изъ

точки L , сдѣлавшись по выходѣ изъ первой линзы I меньше расходящимся, будетъ свободнымъ отъ сферической абберраціи, но, конечно, онъ не будетъ свободнымъ отъ хроматической абберраціи. Этотъ пучекъ, идя дальше, встрѣчаетъ плоскую поверхность линзы II . Линза II такъ расположена, что лучи означеннаго пучка послѣ преломленія плоскою поверхностью ея покажутся исходящими изъ первой апланатической точки сферической поверхности линзы II , слѣдовательно, дойдя до сферической поверхности линзы II , они преломятся ею безъ сферической абберраціи и по выходѣ изъ нея будутъ казаться исходящими почти изъ второй апланатической точки преломляющей сферической поверхности линзы II . Такимъ образомъ весьма широкій коническій пучекъ лучей, который первоначально вышелъ изъ точки L , претерпѣвъ трехкратное преломленіе во время прохожденія черезъ двѣ первыя линзы I и II , сдѣлается гораздо меньше расходящимся (сѣзутся), причемъ сферическая абберрація будетъ присуща ему по столько, по сколько она является при преломленіи плоскою поверхностью линзы II . Но зато хроматическая абберрація этого пучка будетъ значительна. Остальныя линзы III и IV предназначены для того, чтобы устранить тѣ недостатки, которые накопились при прохожденіи лучей черезъ первыя двѣ линзы I и II , и превратить расходящійся пучекъ въ сходящійся. Очевидно, что самымъ главнымъ изъ упомянутыхъ недостатковъ будетъ значительная хроматическая абберрація со знакомъ (+). Поэтому остальныя линзы III и IV должны обладать хроматическою абберраціею съ отрицательнымъ знакомъ (—), т. е. онѣ должны быть значительно хроматически перенсправленными (§ 41), но въ то же время онѣ должны быть не расшивательными, а собирательными, дабы расходящійся пучекъ лучей окончательно (по выходѣ изъ системы) сдѣлался сходящимся.

Утилизировать свойство апланатическихъ точекъ не удалось болѣе двухъ разъ, такъ какъ въ противномъ случаѣ невозможно потому уничтожить сильно возросшую хроматическую абберрацію и сдѣлать пучекъ надлежащимъ образомъ сходящимся.

Оказывается, значить, что при этой конструкціи объектива—по принципу Амичи—каждая изъ линзъ I , II , III и IV сама по себѣ неахроматическая. Но въ общемъ вся система ахроматическая, такъ какъ хроматич. абберрація опредѣленнаго знака, накопляющаяся въ однихъ линзахъ, компенсируется хроматическою абберраціею обратнаго знака, являющеюся отъ остальныхъ линзъ. Значить, принципъ Амичи связанъ съ принципомъ компенсаціи. Принципъ компенсаціи играетъ весьма важную роль при устройствѣ вообще оптической системы. Кстати замѣтимъ, что апланатическія точки L и L_1 рассчитаны для самыхъ яркихъ лучей (около D).

Можно по принципу Амиги устроить и действительно устраиваютъ объективы для микроскопа, представляющіе собою сухія системы, въ которыхъ нѣтъ никакой жидкости. Фигура 85 изображаетъ такую сухую систему въ сильно увеличенномъ размѣрѣ. Обозначимъ

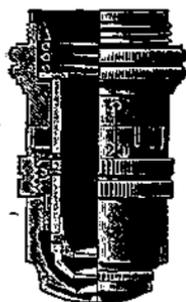


фиг. 85.

поверхности двухъ первыхъ линзъ въ послѣдовательномъ порядкѣ цифрами 1, 2, 3 и 4. Предметъ помѣщается въ такой точкѣ L , что лучи, выйдя изъ нея и преломившись первою плоскою поверхностью 1 линзы I , направляются такъ, что кажутся идущими изъ первой апланатической точки L_1 сферической поверхности 2 линзы I , а дойдя до этой поверхности, они преломляются ею и кажутся послѣ этого идущими изъ второй апланатической точки L_2 , принадлежащей той же сферич. поверхности 2 линзы I ; затѣмъ лучи идутъ дальше, проходятъ черезъ первую сферич. поверхность 3 линзы II , не преломляясь, такъ какъ центръ этой сферич. поверх. 3 совпадаетъ съ точкою L_2 , изъ которой лучи кажутся идущими. Но надо замѣтить, что эта точка L_2 въ то же время есть первая апланатическая точка сферич. поверхности 4 линзы II ; поэтому лучи, дойдя до поверхности 4, преломляются ею, послѣ чего они кажутся идущими изъ второй апланатической точки L_4 поверхности 4. Такимъ образомъ пучекъ лучей, проходя черезъ двѣ первыя линзы I и II , претерпѣваетъ трехкратное преломленіе: въ поверхностяхъ 1, 2 и 4, причемъ только первая поверхность 1 причиняетъ сферическую aberrацію. Назначеніе остальныхъ линзъ III и IV то же, что и въ предыдущей системѣ.

При устройствѣ сухой системы вводятъ еще поправку на покровное стекло, которымъ прикрываютъ предметъ и которое вноситъ нѣкоторую долю aberrаціи, а въ сильныхъ системахъ это обстоятельство можетъ имѣть значеніе. Фигура 86 представляетъ только что описанную систему въ оправѣ почти въ натуральную величину. Оправа такъ устроена, что разстояніе двухъ верхнихъ линзъ отъ

двухъ пижныхъ мѣняется поворачиваніемъ такъ называемаго *коррекціоннаго кольца*, благодаря чему система можетъ быть приспособлена къ покровнымъ стекламъ разпой толщины. Но теперь въ сильныхъ системахъ линзы закрѣпляются разъ навсегда въ неизмѣнномъ разстояніи другъ отъ друга.



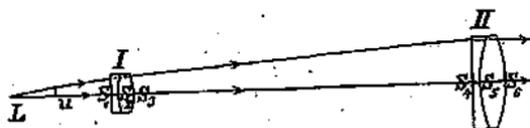
фиг. 86.

Существуютъ различными видоизмѣненія описанныхъ двухъ системъ. Самую совершенную изъ всѣхъ извѣстныхъ до сихъ поръ микроскопическихъ системъ (объективовъ) представляетъ апохроматъ. Въ немъ въ высокой степени уничтожена хроматическая аберрація (уничтоженъ даже вторичный спектръ) и въ высокой степени устранена сферическая аберрація (для трехъ лучей). Апохроматъ для микроскопа отличается тою особенностью, что онъ для всѣхъ зонъ обладаетъ одинаковою цвѣтною (хроматическою) разницею увеличенія (§ 40), вслѣдствіе чего ее возможно устранить окуляромъ. Нужно только, чтобы послѣдній обладалъ тоже цвѣтною разницею увеличенія, но обратнаго характера (обратнаго знака) сравнительно съ цвѣтною разницею увеличенія объектива. Такие окуляры называются *компенсационными*.

Къ объективу микроскопа предъявляются слѣдующія требованія:

1. устраненіе въ немъ сферич. аберраціи § 34,
2. соблюденіе условія синусовъ § 35,
3. устраненіе хроматич. аберраціи § 42 (главнымъ образомъ достиженіе одинаковаго мѣста для изображеній важнѣйшихъ цвѣтовъ),
Затѣмъ желательно соблюденіе еще и слѣдующихъ условій:
4. устраненіе сферической аберраціи для многихъ цвѣтовъ (устраненіе хроматической разницы сферической аберраціи § 46),
5. соблюденіе условія синусовъ для многихъ цвѣтовъ § 47.

Въ концѣ этого параграфа приведены данныя, для построенія нѣкоторыхъ типовъ микроскопическихъ объективовъ.



фиг. 87.

Я старался изъ тѣхъ же стеколъ 0.60 и 0.93, изъ которыхъ былъ вычисленъ мною объективъ для телескопа (§ 48), вычислить объективъ и для микроскопа, при чемъ мнѣ было желательно, чтобы этотъ объективъ можно было легко устроить и чтобы при помощи его

можно было достигнуть увеличенія по крайней мѣрѣ въ 100 разъ. Предметъ предполагался въ воздухѣ безъ покровнаго стекла.

Ниже помѣщенная таблица № II представляетъ результаты моихъ изслѣдованій.

Фиг. 87 представляетъ расположеніе линзъ въ этомъ объективѣ. Онъ состоитъ изъ двухъ системъ *I* и *II*. Каждая составлена изъ рассеивательной флинтгласовой линзы, обращенной плоскою поверхностью къ предмету, и собирательной кронгласовой линзы. Размѣры на чертежѣ почти въ 2 раза больше дѣйствительныхъ.

Элементы, опредѣляющіе объективъ:

Дѣйствительные размѣры радиусовъ:	Дѣйствительныя разстоянія между преломляющими поверхн.:
$r_1 = \infty$	$S_1 S_2 = d_1 = 0,5$
$r_2 = r_3 = 5$	$S_2 S_3 = d_2 = 0,9$
$r_4 = \infty$	$S_3 S_4 = d_3 = 21,6$
$r_5 = r_6 = 13,4$	$S_4 S_5 = d_4 = 0,6$
	$S_5 S_6 = d_5 = 1,6$

Разстояніе предмета L отъ первой преломляющей поверхности $LS_1 = s_1 = 6$.

Фокусное разстояніе

$$F = 19,9.$$

Фокусное разстояніе вычислено по формулѣ

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F'} + \frac{1}{F''} - \frac{d}{F' \cdot F''}$$

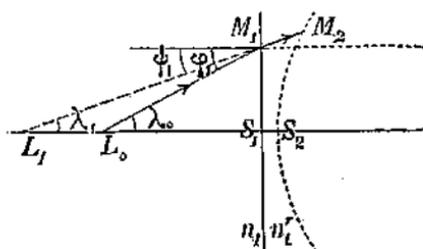
гдѣ F' и F'' соответственно выражаютъ фокусныя разстоянія системъ *I* и *II*, а d — разстояніе между системами (§ 33).

Всѣ означенные размѣры выражены въ миллиметрахъ.

$$\text{Угловое отверстіе } 2u = 2\lambda_0 = 20^\circ$$

Роды стеколъ:	n_c	n_D	n_F
Кронгласъ 0.60	1,51477	1,5173	1,52332
Флинтгласъ 0.93	1,61932	1,6243	1,63678

Чертежи для отдѣльныхъ преломляющихъ поверхностей сдѣланы только по отношенію къ первой системѣ *I*, такъ какъ для второй системы, *II* они могутъ быть легко воспроизведены по аналогіи съ чертежами для системы *I*.



фиг. е

$$\varphi_1 = \lambda_0 = 10^\circ$$

$$n' \sin \psi_1 = n \sin \varphi_1$$

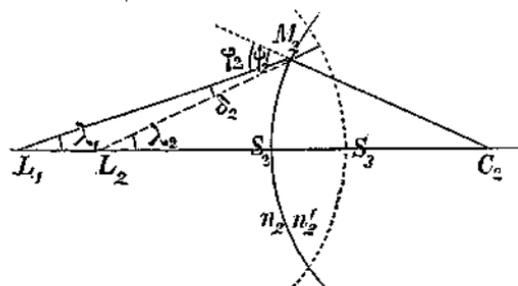
$$\psi_1 = \lambda_1$$

$$M_1 S_2 = L_0 S_1 \operatorname{tg} \lambda_0 = L_0 S_1 \operatorname{tg} \varphi_1$$

$$L_1 S_1 = M_1 S_1 \operatorname{cotg} \lambda_1 = M_1 S_1 \operatorname{cotg} \psi_1;$$

следовательно

$$L_1 S_1 = L_0 S_1 \operatorname{tg} \varphi_1 \cdot \operatorname{cotg} \psi_1$$



фиг. ф

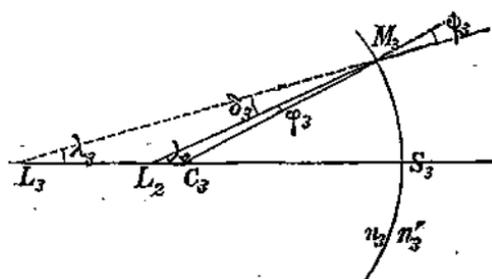
$$\frac{L_1 C_2}{M_2 C_3} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \lambda_1} \quad \text{или} \quad \frac{L_1 C_2}{r_2} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \lambda_1}$$

$$n'_2 \sin \psi_2 = n_2 \sin \varphi_2$$

$$\delta_2 = \psi_2 - \varphi_2$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \delta_2$$

$$\frac{L_2 C_2}{M_2 C_2} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \lambda_2} \quad \text{или} \quad \frac{L_2 C_2}{r_2} = \frac{\sin \psi_2}{\sin \lambda_2}$$



фиг. г

$$\frac{L_2 C_3}{M_3 C_3} = \frac{\sin \varphi_3}{\sin \lambda_2} \quad \text{или} \quad \frac{L_2 C_3}{-r_3} = \frac{\sin \varphi_3}{\sin \lambda_2}$$

$$n'_3 \sin \psi_3 = n_3 \sin \varphi_3$$

$$\delta_3 = \psi_3 - \varphi_3$$

$$\lambda_3 = \lambda_2 - \delta_3$$

$$\frac{L_3 C_3}{M_3 C_3} = \frac{\sin \psi_3}{\sin \lambda_3} \quad \text{или} \quad \frac{L_3 C_3}{-r_3} = \frac{\sin \psi_3}{\sin \lambda_3}$$

ТАБЛИЦА № II.

№ чертежа	Нецентральные лучи			Центральные лучи				
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>		
Фиг. е	$\varphi_1 = \lambda_0$	10°	10°	10°	$L_0 S_1 = -s_1$	6	6	6
	$\lg n_1$	0	0	0	$\lg (-s_1)$	0,77815	0,77815	0,77815
	$\lg \sin \varphi_1$	$\bar{1},23967$	$\bar{1},23967$	$\bar{1},23967$	$\lg n_1$	0	0	0
	$-\lg n'_1$	$\bar{1},79066$	$\bar{1},78938$	$\bar{1},78601$	$-\lg (-s_1)$	$\bar{1},22185$	$\bar{1},22185$	$\bar{1},22185$
	$\log \sin \psi_1$	$\bar{1},03033$	$\bar{1},02900$	$\bar{1},02568$	$\lg \frac{n_1}{-s_1}$	$\bar{1},22185$	$\bar{1},22185$	$\bar{1},22185$
	ψ_1	6°9'21"	6°8'13"	6°5'24"	$-\lg n'_1$	$\bar{1},79066$	$\bar{1},78938$	$\bar{1},78601$
	$L_0 S_1$	6	6	6	$\lg \frac{1}{-s'_1}$	$\bar{1},01251$	$\bar{1},01118$	$\bar{1},00786$
	$\lg L_0 S_1$	0,77815	0,77815	0,77815	$\lg (-s'_1)$	0,98749	0,98882	0,99214
	$\lg \operatorname{tg} \varphi_1$	$\bar{1},24632$	$\bar{1},24632$	$\bar{1},24632$	$L_1 S_1 = -s'_1$	9,716	9,746	9,821
	$\lg \operatorname{cotg} \psi_1$	0,96716	0,96850	0,97186	$S_1 S_2$	0,5	0,5	0,5
	$\lg L_1 S_1$	0,99163	0,99297	0,99633				
$L_1 S_1$	9,8092	9,8895	9,9162					
$S_1 S_2$	0,5	0,5	0,5					
Фиг. і.	$L_1 S_2$	10,3092	10,3395	10,4162	$L_1 S_2 = -s_2$	10,216	10,246	10,321
	$S_2 C_2 = r_2$	5	5	5	$\lg (-s_2)$	1,00928	1,01055	1,01872
	$L_1 C_2$	15,3092	15,3395	15,4162	$\lg n_2$	0,20934	0,21067	0,21399
	$\lg L_1 C_2$	1,18495	1,18581	1,18797	$-\lg (-s_2)$	$\bar{2},99072$	$\bar{2},98945$	$\bar{2},98628$
	$\lg \sin \lambda_1$	$\bar{1},03033$	$\bar{1},02900$	$\bar{1},02568$	$\lg \frac{n_2}{-s_2}$	$\bar{1},20006$	$\bar{1},20012$	$\bar{1},20027$
	$-\lg r_2$	$\bar{1},30103$	$\bar{1},30103$	$\bar{1},30103$	$\frac{n_2}{s_2}$	-0,15851	-0,15853	-0,15859
	$\lg \sin \varphi_2$	$\bar{1},51631$	$\bar{1},51584$	$\bar{1},51468$	$\lg(n_2 - n'_2)$	$\bar{1},01982$	$\bar{1},02938$	$\bar{1},05484$
	$\lg n_2$	0,20934	0,21067	0,21399	$-\lg r_2$	$\bar{1},30103$	$\bar{1},30103$	$\bar{1},30103$
	$\lg \sin \varphi_2$	$\bar{1},51631$	$\bar{1},51584$	$\bar{1},51468$	$\lg \frac{n_2 - n'_2}{r_2}$	$\bar{2},32035$	$\bar{2},33041$	$\bar{2},35587$
	$-\lg n'_2$	$\bar{1},81965$	$\bar{1},81893$	$\bar{1},81721$	$\frac{n'_2 - n_2}{r_2}$	-0,02091	-0,02140	-0,02269
	$\lg \sin \psi_2$	$\bar{1},54530$	$\bar{1},54544$	$\bar{1},54588$	$\frac{n_2}{s_2}$	-0,15851	-0,15853	-0,15859
	ψ_2	20°32'53"	20°33'18"	20°34'37"	N_2	-0,17942	-0,17993	-0,18128
	φ_2	19°10'3"	19°8'45"	19°5'34"				
	δ_2	1°22'50"	1°24'33"	1°29'3"				
λ_1	6°9'21"	6°8'13"	6°5'24"					
λ_2	7°32'11"	7°32'46"	7°34'27"					
$\lg \sin \lambda_2$	$\bar{1},11779$	$\bar{1},11835$	$\bar{1},11995$					

№ 1 чертежа	Нецентральные лучи			центральные лучи				
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>		
	$\lg \sin \psi_2$	$\overline{1,54530}$	$\overline{1,54544}$	$\overline{1,54588}$	$\lg (-N_2)$	$\overline{1,25887}$	$\overline{1,25510}$	$\overline{1,25835}$
	$\lg r_2$	0,69397	0,69897	0,69897	$-\lg n'_2$	$\overline{1,81965}$	$\overline{1,81893}$	$\overline{1,81721}$
	$-\lg \sin \lambda_2$	0,88221	0,88165	0,88005	$\lg \frac{1}{-s'_2}$	$\overline{1,07852}$	$\overline{1,07403}$	$\overline{1,07556}$
	$\lg L_2 C_2$	1,12648	1,12606	1,12490	$\lg (-s'_2)$	0,92648	0,92597	0,92444
	$L_2 C_2$	13,88	13,868	13,882	$-s'_2$	8,4426	8,438	8,4081
	$-r_2$	-5	-5	-5	$S_2 S_3$	0,9	0,9	0,9
	$L_2 S_2$	8,88	8,868	8,832				
$S_2 S_3$	0,9	0,9	0,9					
фиг. 6	$L_2 S_3$	9,28	9,268	9,232	$-s_2$	9,3426	9,333	9,3031
	r_2	-5	-5	-5	$\lg (-s_2)$	0,97047	0,97002	0,96863
	$L_2 C_3$	4,28	4,266	4,232	$\lg n_2$	$\overline{0,18035}$	$\overline{0,18107}$	$\overline{0,18279}$
	$\lg L_2 C_3$	0,63144	0,63022	0,62655	$-\lg (-s_2)$	$\overline{1,02953}$	$\overline{1,02998}$	$\overline{1,03187}$
	$\lg \sin \lambda_2$	$\overline{1,11779}$	$\overline{1,11835}$	$\overline{1,11995}$	$\lg (-n_2/s_2)$	$\overline{1,20988}$	$\overline{1,21105}$	$\overline{1,21416}$
	$-\lg (-r_2)$	$\overline{1,30108}$	$\overline{1,30108}$	$\overline{1,30108}$	n_2/s_2	-0,16214	-0,16257	-0,16374
	$\lg \sin \varphi_2$	$\overline{1,05026}$	$\overline{1,04960}$	$\overline{1,04753}$	$\lg(n_2-n'_2)$	$\overline{1,71161}$	$\overline{1,71874}$	$\overline{1,71877}$
	$\lg n_2$	0,18035	0,18107	0,18279	$-\lg (-r_2)$	$\overline{1,30103}$	$\overline{1,30103}$	$\overline{1,30103}$
	$\lg \sin \varphi_2$	$\overline{1,05026}$	$\overline{1,04960}$	$\overline{1,04753}$	$\lg \frac{n'_2-n_2}{r_2}$	$\overline{1,01264}$	$\overline{1,01477}$	$\overline{1,01980}$
	$\lg \sin \psi_2$	$\overline{1,23061}$	$\overline{1,23067}$	$\overline{1,23032}$	n'_2-n_2	0,10295	0,10346	0,10466
	ψ_2	9°47'29"	9°47'34"	9°47'6"	r_2			
	φ_2	6°26'46"	6°26'10"	6°24'20"	n_2/s_2	-0,16214	-0,16257	-0,16374
	δ_2	3°20'43"	3°21'24"	3°22'46"	$N_2 = \frac{1}{-s'_2}$	-0,05919	-0,05911	-0,05908
	λ_2	7°32'11"	7°32'46"	7°34'27"	$\lg \frac{1}{-s'_2}$	$\overline{2,77225}$	$\overline{2,77166}$	$\overline{2,77144}$
	$\lambda_2 = \varphi_2$	4°11'28"	4°11'22"	4°11'41"	$\lg (-s'_2)$	1,22775	1,22834	1,22856
	$\lg \sin \lambda_2$	$\overline{2,86882}$	$\overline{2,86864}$	$\overline{2,86419}$	$-s'_2$	16,895	16,918	16,926
	$\lg \sin \psi_2$	$\overline{1,23061}$	$\overline{1,23067}$	$\overline{1,23032}$	$-s'_2$	16,895	16,918	16,926
	$\lg(-r_2)$	0,69897	0,69897	0,69897	$S_2 S_3$	21,6	21,6	21,6
	$-\lg \sin \lambda_2$	1,13618	1,13686	1,13581	$-s_2$	38,495	38,518	38,526
	$\lg L_2 C_2$	1,06576	1,06600	1,06510				
$L_2 C_2$	11,635	11,641	11,617					
$C_2 S_2 = -r_2$	5	5	5					
$L_2 S_2$	16,635	16,641	16,617					
$S_2 S_3$	21,6	21,6	21,6					
$L_2 S_4$	38,235	38,241	38,217					

	Нецентральные лучи			центральные лучи			
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>		<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>
$\lg \sin \varphi_4$	$\bar{2},86382$	$\bar{2},86364$	$\bar{2},86419$	$\lg(-s_4)$	1,58540	1,58567	1,58576
$-\lg \sin \lambda_3$	$\bar{1},79666$	$\bar{1},78933$	$\bar{1},78601$	$\lg \frac{n_4}{s_4}$	$\bar{2},41460$	$\bar{2},41433$	$\bar{2},41424$
$-\lg n'_4$	$\bar{2},65448$	$\bar{2},65297$	$\bar{2},65020$	$-\lg n'_4$	$\bar{1},79066$	$\bar{1},78983$	$\bar{1},78601$
$\lg \sin \psi_4$	$2^{\circ}35'12''$	$2^{\circ}34'40''$	$2^{\circ}33'41''$	$\lg \frac{1}{-s'_4}$	$\bar{2},20526$	$\bar{2},20366$	$\bar{2},20025$
$\psi_4 = \lambda_4$	$2^{\circ}35'12''$	$2^{\circ}34'40''$	$2^{\circ}33'41''$	$\lg(-s'_4)$	1,79474	1,79634	1,79975
$\lg L_3 S_4$	1,58246	1,58253	1,58226	$-s'_4$	62,336	62,566	63,06
$\lg \operatorname{tg} \varphi_4$	$\bar{2},86498$	$\bar{2},86481$	$\bar{2},86536$	$S_4 S_5$	0,6	0,6	0,6
$\lg \operatorname{cotg} \psi_4$	1,34509	1,34659	1,34936				
$\lg L_1 S_4$	1,79253	1,79393	1,79698				
$L_4 S_4$	62,02	62,22	62,66				
$S_4 S_5$	0,6	0,6	0,6				
$L_4 S_5$	62,82	62,82	63,26	$-s_5$	62,936	63,166	63,66
r_3	13,4	13,4	13,4	$\lg(-s_5)$	1,79890	1,80048	1,80387
$L_4 C_5$	76,02	76,22	76,66	$\lg n_5$	0,20934	0,21067	0,21399
$\lg L_4 C_5$	1,88098	1,88207	1,88457	$-\lg(-s_5)$	$\bar{2},20110$	$\bar{2},19952$	$\bar{2},19613$
$\lg \sin \lambda_4$	$\bar{2},65448$	$\bar{2},65297$	$\bar{2},65020$	$\lg \frac{n_5}{-s_5}$	$\bar{2},41044$	$\bar{2},41019$	$\bar{2},41012$
$-\lg r_5$	$\bar{2},87290$	$\bar{2},87290$	$\bar{2},87290$	$\lg(n_5 - n'_5)$	$\bar{1},01932$	$\bar{1},02938$	$\bar{1},05434$
$\lg \sin \varphi_5$	$\bar{1},40381$	$\bar{1},40794$	$\bar{1},40767$	$-\lg r_5$	$\bar{2},87290$	$\bar{2},87290$	$\bar{2},87290$
$\lg n_5$	0,20934	0,21067	0,21399	$\lg \frac{n_5 - n'_5}{r_5}$	$\bar{3},89222$	$\bar{3},90223$	$\bar{3},92774$
$\lg \sin \varphi_5$	$\bar{1},40381$	$\bar{1},40794$	$\bar{1},40767$	$\frac{n_5}{s_5}$	-0,02573	-0,025715	-0,025711
$-\lg n'_5$	$\bar{1},81965$	$\bar{1},81893$	$\bar{1},81721$	$n'_5 - n_5$	-0,007802	-0,007985	-0,008467
$\lg \sin \psi_5$	$\bar{1},43730$	$\bar{1},43754$	$\bar{1},43887$	r_5	$\bar{0},083582$	$\bar{0},083700$	$\bar{0},084178$
ψ_5	$15^{\circ}53'8''$	$15^{\circ}53'40''$	$15^{\circ}56'41''$	N_5	$\bar{2},52546$	$\bar{2},52763$	$\bar{2},53374$
φ_5	$14^{\circ}50'7''$	$14^{\circ}49'20''$	$14^{\circ}48'46''$	$-\lg n'_5$	$\bar{1},81965$	$\bar{1},81893$	$\bar{1},81721$
δ_5	$1^{\circ}3'1''$	$1^{\circ}4'20''$	$1^{\circ}7'55''$	$\lg \frac{1}{-s'_5}$	$\bar{2},34511$	$\bar{2},34656$	$\bar{2},35096$
λ_4	$2^{\circ}35'12''$	$2^{\circ}34'40''$	$2^{\circ}33'41''$	$\lg(-s'_5)$	1,65489	1,65344	1,64905
λ_5	$3^{\circ}38'18''$	$3^{\circ}39'$	$3^{\circ}41'35''$	$-s'_5$	45,174	45,023	44,571
$\lg \sin \lambda_3$	$\bar{2},80232$	$\bar{2},80388$	$\bar{2},80900$	$S_5 S_6$	1,6	1,6	1,6
$\lg \sin \psi_5$	$\bar{1},43730$	$\bar{1},43754$	$\bar{1},43887$				
$\lg r_5$	1,12710	1,12710	1,12710				
$-\lg \sin \lambda_5$	1,19768	1,19612	1,19100				
$\lg L_5 C_5$	1,76208	1,76076	1,75697				
$L_5 C_5$	57,82	57,645	57,144				
$-r_5$	-13,4	-13,4	-13,4				
$L_5 S_5$	44,42	44,245	43,744				
$S_5 S_6$	1,6	1,6	1,6				

	Нецентральные лучи			центральные лучи			
	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	
$L_3 S_6$	46,02	45,845	45,344	$-s_6$	46,774	46,623	46,171
r_6	-13,4	-13,4	-13,4	$\lg(-s_6)$	1,67000	1,66860	1,66487
$L_3 C_6$	32,62	32,445	31,944	$\lg n_6$	0,18035	0,18107	0,18279
$\lg L_3 C_6$	1,51848	1,51115	1,50439	$-\lg(-s_6)$	2,33000	2,33140	2,33563
$\lg \sin \lambda_6$	2,80232	2,80388	2,80900	$\lg \frac{n_6}{-s_6}$	2,51035	2,51247	2,51842
$-\lg(-r_6)$	2,87290	2,87290	2,87290	$\lg(n_6 - n'_6)$	1,71161	1,71374	1,71877
$\lg \sin \varphi_6$	1,18870	1,18792	1,18629	$-\lg(-r_6)$	2,87290	2,87290	2,87290
$\lg n_6$	0,18035	0,18107	0,18279	$\lg \frac{n'_6 - n_6}{r_6}$	2,58451	2,58664	2,59167
$\lg \sin \varphi_6$	1,18870	1,18792	1,18629	$\frac{n_6' - n_6}{r_6}$	+0,038416	+0,088605	+0,039055
$\lg \sin \psi_6$	1,36905	1,36899	1,36908	$\frac{n_6}{s_6}$	-0,032385	-0,032544	-0,032993
ψ_6	13°31'39"	13°31'32"	13°31'42"	$\frac{1}{s'_6}$	0,006031	0,006061	0,006062
φ_6	8°53'	8°52'2"	8°50'1"	$\lg \frac{1}{s'_6}$	3,78089	3,78254	3,78282
δ_6	4°38'39"	4°39'30"	4°41'41"	$\lg s'_6$	2,21961	2,21746	2,21738
λ_6	3°38'13"	3°39'	3°41'36"	s'_6	165,81	164,99	164,96
λ_6	1°0'26"	1°0'30"	1°0'5"				
$\lg \sin \lambda_6$	2,24496	2,24544	2,24246				
$\lg \sin \psi_6$	1,36905	1,36899	1,36908				
$\lg(-r_6)$	1,12710	1,12710	1,12710				
$-\lg \sin \lambda_6$	1,75504	1,75456	1,75754				
$\lg L_6 C_6$	2,25119	2,25065	2,25872				
$L_6 C_6$	178,32	178,1	179,36				
r_6	-13,4	-13,4	-13,4				
$S_6 L_6$	164,92	164,7	165,96				

Полученные результаты показывают, что все лучи *C*, *D* и *F*, как крайние, так и центральные, вышедшие первоначально из точки L_0 , по выходе из объектива пересекают ось почти на одном и том же расстоянии, равном 165 мм.

Теперь интересно проверить условие синусовъ. На основании таблицы № II для луча *D* имеемъ

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{\sin \lambda_6}{\sin \lambda_0} = \frac{\sin 1^\circ 0' 30''}{\sin 10^\circ} = 0,1013.$$

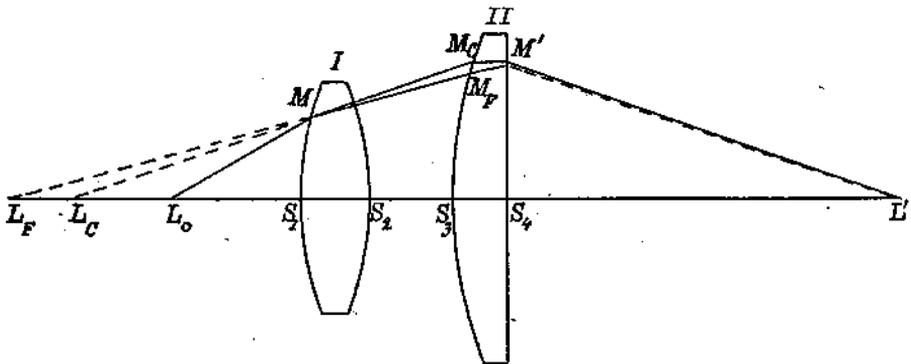
Взявъ лучъ *D*, исходящій изъ точки L_0 (фиг. е) подъ угломъ $\lambda_0 = 6^\circ$, мы бы соответственно ему нашли $\lambda_6 = 0^\circ 36' 19''$; поэтому для этого луча мы бы имѣли:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{\sin \lambda_6}{\sin \lambda_0} = \frac{\sin 0^{\circ}36'19''}{\sin 6^{\circ}} = 0,1011;$$

слѣдовательно въ вычисленномъ мною объективѣ и условіе синусовъ соблюдено въ достаточной степени.

Въ дѣйствительности я принялъ угловое отверстие $2 \lambda_0 = 23^{\circ}$ и на самомъ дѣлѣ приготовилъ означенный объективъ. Производя съ нимъ наблюденія и сравнивая его съ объективомъ № 3 г. Лейтца, я нашелъ, что предметы, непокрытые покровнымъ стекломъ, подъ моимъ объективомъ казались отчетливѣе, чѣмъ подъ объективомъ № 3 г. Лейтца при одинаковомъ окулярѣ, а предметы, прикрытые покровнымъ стекломъ, казались подъ объективомъ № 3 г. Лейтца, какъ будто нѣсколько отчетливѣе, чѣмъ подъ моимъ, при чемъ объективъ № 3 г. Лейтца давалъ увеличеніе немного большее, чѣмъ мой при томъ же окулярѣ. При сравненіи брались такіе предметы, какъ крылья, лапки и глава мухи или другихъ насекомыхъ, а подъ покровнымъ стекломъ наблюдались чешуйки съ крыльевъ бабочекъ. Увеличеніе съ моимъ объективомъ доводилось до 140 разъ и замѣчательно, что съ возрастаніемъ увеличенія отчетливость изображенія, равномерная по всему полю его, не измѣнялась замѣтно.

Я хотѣлъ бы еще предложить тѣмъ, которые пожелали бы вычислять объективъ или вообще систему, слѣдующій совѣтъ, добытый продолжительнымъ опытомъ. Положимъ, что у насъ имѣется въ проектѣ объективъ или вообще вѣкоторая оптическая система (фиг. 88)

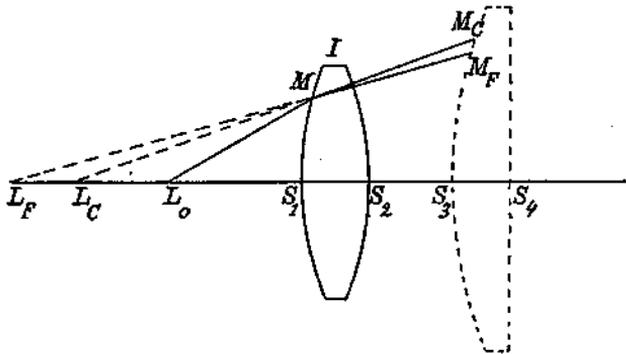


фиг. 88.

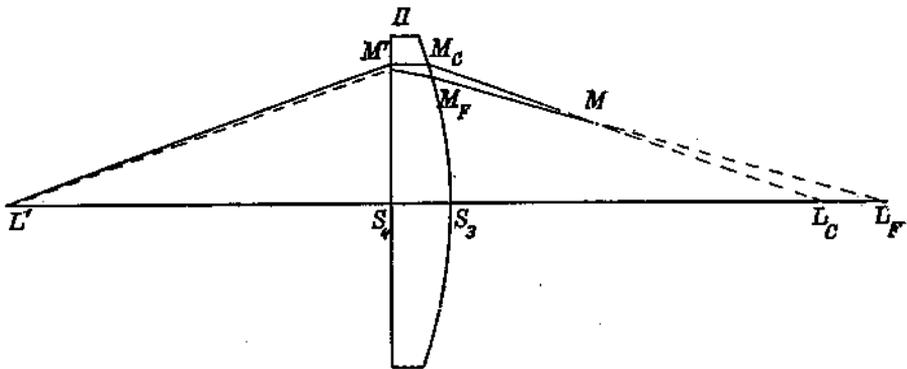
и мы желаемъ, напр. чтобы лучи, выходящіе изъ точки L_0 , по выходѣ изъ системы собирались въ точкѣ L' . Допустимъ, что мы уже имѣемъ грубыя приближенныя значенія радиусовъ преломляющихъ поверхностей и другіе элементы, какъ напр. разстоянія между поверхн. и показатели преломленія средъ, черезъ которыя должны идти лу-

чи. Приблизженныя значенія радіусовъ всегда можно найти, хотя бы беря во вниманіе лишь центральные лучи, для которыхъ существуютъ сравнительно простыя формулы. Значить, намъ остается усовершенствовать проектъ, подыскивая лучшія значенія радіусовъ, а въ крайнемъ случаѣ не только радіусовъ, но и разстояній преломляющихъ поверхностей и даже показателей преломленія.

Намѣрены ли мы производить дальнѣйшія изысканія черченіемъ или вычисленіями, въ обоихъ случаяхъ было бы непрактично съ самаго же начала этихъ изысканій производить работу, начиная съ первой преломляющей поверхности и кончая послѣднею поверхностью.



фиг. 89.



фиг. 90.

Мы можемъ скорѣе придти къ желаемой цѣли, поступая слѣдующимъ образомъ. Допустимъ, что наша задача уже рѣшена и что система наша (фиг. 88) такова, что въ самомъ дѣлѣ лучи, исходящіе изъ ѳойлы точки L_o , по выходѣ изъ системы пересѣкаютъ ось въ точкѣ L' . Для простоты разсужденій возьмемъ во вниманіе лишь хроматическую абберрацію и мысленно разобьемъ систему (фиг. 88)

на двѣ части *I* и *II*. Какойнибудь бѣлый луч L_0M , выйдя изъ первой части *I*, вообще говоря, разложится на цвѣтные лучи, причѣмъ оранжевый луч *C*, выходя изъ первой части *I* расположится, напр. по прямой $L_C M_C$, а голубой лучъ *F* по прямой $L_F M_F$, но положимъ, что пройдя еще и черезъ вторую часть *II*, эти лучи почти сливаются, идя по $M'L'$. При такомъ допущеніи мы должны заключить, что если бы бѣлый лучъ шелъ обратно изъ *L'* по $L'M'$, то, выйдя изъ второй части *II*, онъ долженъ былъ бы разложиться на цвѣтные лучи, при чемъ лучъ *C* пошелъ бы влѣво по направленію $M_C L_C$, а лучъ *F* по $M_F L_F$. Но пройдя еще черезъ первую часть *I*, означенные лучи опять должны были бы слиться въ одинъ бѣлый лучъ и идти по ML_0 , попадая въ L_0 . Вообразимъ теперь, что вторая часть *II* вмѣстѣ со своими лучами, идущими изъ *L'*, отдѣлилась отъ части *I* и повернувшись обратно (правою стороною—налѣво, а лѣвою—направо), заняла положеніе, какъ показано на чертежѣ (фиг. 90), а первая часть *I*, оставаясь со своими лучами, идущими изъ L_0 , сохранила положеніе, какъ показано на чертежѣ (фиг. 89). Очевидно изъ сказаннаго, что разстояніе $L_0 S_2$ и $L_F S_2$, какъ на чертежѣ (фиг. 89), такъ и на чертежѣ (фиг. 90) численно должны представлять однѣ и тѣ же величины, если вся система уже исправлена. Вотъ поэтому-то мы можемъ вести изысканія отдѣльно для каждой изъ частей *I* и *II*, при чемъ для первой части *I* (фиг. 89) будемъ предполагать, что лучи идутъ изъ L_0 вправо, а для второй части *II* (фиг. 90)—изъ *L'* вправо и задача наша теперь сводится къ отысканію такихъ системъ *I* и *II*, чтобы лучи *C* и *F*, вышедшіе изъ точки L_0 (фиг. 89) и содержащіяся въ бѣломъ лучѣ $L_0 M$, по выходѣ изъ части *I* направлялись дальше такъ, чтобы геометрически ихъ продолженія пересѣкали ось по возможности на такихъ же разстояніяхъ $L_C S_2$ и $L_F S_2$ отъ S_2 , на какихъ разстояніяхъ отъ S_1 (фиг. 90) пересѣкаютъ ось лучи, вышедшіе изъ *L'* и прошедшіе черезъ часть *II*. Когда это достигнуто, приводимъ систему *II* (фиг. 90) въ прежнее положеніе и на прежнее мѣсто (фиг. 88) и задачу будемъ считать рѣшенною въ томъ смыслѣ, что лучи *C* и *F* по выходѣ изъ L_0 (фиг. 88) и пройдя черезъ всю систему (*I* + *II*), будутъ собираться въ одной точкѣ *L'*, и только теперь полезно и даже слѣдуетъ произвести вычисленіе хода лучей, начиная съ первой поверхности и кончая послѣдней, чтобы окончательно провѣрить прежнія дѣйствія. Такой способъ тѣмъ хорошѣе, что въ немъ мы можемъ измѣнять сначала только послѣднюю поверхность S_2 для случая (фиг. 89) и S_3 для случая (фиг. 90) и этимъ уже можемъ радикально измѣнить ходъ лучей въ томъ или другомъ смыслѣ, а потомъ по мѣрѣ надобности можно измѣнять разстояніе $S_2 S_3$ между частями *I* и *II* или же можно замѣнить вещество послѣд-

ней линзы новыми. Дѣлая то или другое измѣненіе, мы путемъ продолжительныхъ испытаній можемъ наконецъ пайти найвыгоднѣйшую комбинацію.

Если я иногда и достигалъ удовлетворительныхъ результатовъ при вычисленіи объективовъ, то только благодаря этому послѣднему приему. Конечно, трудно высказать всевозможныя подробности, которыя могутъ встрѣтиться при подобныхъ изслѣдованіяхъ и могутъ имѣть значеніе. Но на первыхъ порахъ полезно имѣть хоть кое-какія указанія. Можетъ быть существуютъ особыя, болѣе удобныя приемы, чѣмъ только что описанные мною, но тѣмъ не менѣе я хотѣлъ сообщить читателю хоть то, что самъ подмѣтилъ, какъ полезное, тѣмъ болѣе, что вычисленіе объективовъ вообще, а для микроскопа въ особенности чрезвычайно утомительная работа и безъ великихъ указаній приступать къ подобной работѣ я бы даже нѣкому и не совѣтовалъ.

Ниже приведены готовые данныя для построенія микроскопическихъ объективовъ новѣйшихъ типовъ. Данныя № 1 и № 3 взяты мною изъ сочиненія Глѣйхена*), а данныя № 2 получены мною, благодаря любезности г-на Лейтца, извѣстнаго оптика въ Вецлярѣ.

№ 1.

Нумерическая апертура **) 0,45.

предметъ			
$r_1 = \infty$	} Flint. № 29. Jena	} діаметръ отверстія	} $2h = 8 \text{ mm.};$
$r_2 = 2,75 \text{ линій}$			
$r_3 = -2,5 \text{ ,,}$			
$\Delta_1 = 3,5 \text{ mm.}$			
$r_4 = \infty$	} Flint №. 34 Jena	} $2h = 11 \text{ mm.};$	}
$r_5 = 5 \text{ линій}$			
$r_6 = -5 \text{ ,,}$			
$\Delta_2 = 4,5 \text{ mm.}$			
$r_7 = \infty$	} Flint № 38 Jena	} $2h = 12 \text{ mm.}$	}
$r_8 = 5 \text{ линій}$			
$r_9 = -7,5 \text{ ,,}$			

Здѣсь длина радіусовъ выражена въ парижскихъ линіяхъ (пар. дюймъ = 27,07 mm. = 12 линіямъ); тогда какъ расстоянія между линзами и діаметры ихъ отверстій выражены въ миллиметрахъ.

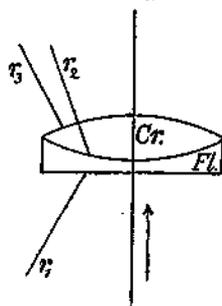
*) Dr. A. Gleichen. Lehrbuch der geometrischen Optik. Leipzig. 1902.

**) о нумерической апертурѣ подробно говорится въ § 67.

Каждая из трех линз, входящих въ составъ этого объектива, имѣетъ видъ, какъ на чертѣжѣ (фиг. 91) и состоитъ изъ флинт-гласа и кроу-гласа, склеенныхъ вмѣстѣ. Толщина линзъ не дана, но должна быть по возможности малая.

Стекла обозначены по каталогу Шотта (Schott & Genossen. Jena).

Системы, у которыхъ нумерическая апертура больше 0,5, строятся такимъ образомъ, что первая отъ предмета линза представляетъ приблизительно полушаріе. Полушаріе иногда прикрѣпляется къ стеклянной пластинкѣ (въ 0,2 или 0,3 линіи толщиной) съ параллельными плоскостями и изъ того же вещества, что и полушаріе. Сама пластинка закрѣпляется въ оправу, а къ ней (пластинкѣ) приклеивается канадскимъ бальзамомъ полушаріе (или приблизительно полушаріе).



фиг. 91.

№ 2.

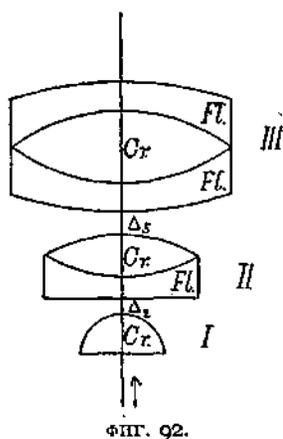
Нумерическая апертура 0,65

$$f = 4,5 \text{ mm.}$$

$r_1 = \infty$	} Crown № 54 линза I
$d_1 = 2,65$	
$r_2 = 2,5$	
$\Delta_2 = 0,1$	} линза II
$r_3 = \infty$	
$d_3 = 1$	
$r_4 = 4,5$	} Crown № 54
$d_4 = 2,17$	
$r_5 = 4,9$	
$\Delta_5 = 0,5$	} линза III
$r_6 = 15,0$	
$d_6 = 1,0$	
$r_7 = 4,75$	} Crown № 1
$d_7 = 3,3$	
$r_8 = 4,75$	
$d_8 = 1,0$	} Flint № 30
$r_9 = 15,0$	

Всѣ протяженія выражены въ миллиметрахъ.

Радиусы обозначены буквою r , толщина линзъ — буквою d и расстояние между линзами — греческою буквою Δ . Стекла, какъ и въ пер-



фиг. 92.

вось примѣръ, обозначены по каталогу Шотта. Чертежъ (фиг. 92) только приблизительно представляетъ систему № 2.

Толщина покровнаго стекла, соответствующаго этой системѣ, достигаетъ 0,16 мм., а длина трубы — 170 мм.

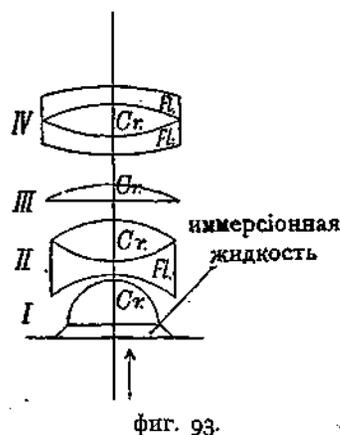
Объ системы № 1 и № 2 представляютъ системы сухія. Ниже приведены данныя для иммерсионной системы.

№ 3.

Ахроматическая система для масляной иммерсiи.

Нумер. апер. 1,30.

Фокусное расстояние $f = 2,1$ мм.



фиг. 93.

$$\begin{array}{l}
 r_1 = \infty \\
 d_1 = 1,0 \\
 r_2 = -0,86 \\
 \Delta_2 = 0,03 \\
 r_3 = -24,0 \\
 d_3 = 0,66 \\
 r_4 = 7,89 \\
 d_4 = 1,74 \\
 r_5 = -5,36 \\
 \Delta_5 = 0,20 \\
 r_6 = -38,0 \\
 d_6 = 1,1 \\
 r_7 = -5,75 \\
 \Delta_7 = 0,55 \\
 r_8 = 40,0 \\
 d_8 = 0,43 \\
 r_9 = 8,86 \\
 d_9 = 2,28 \\
 r_{10} = -8,86 \\
 d_{10} = 2,43 \\
 r_{11} = -43,0
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l} L_1 \\ L_2 \end{array} \right\} I \\
 \left. \begin{array}{l} L_3 \\ L_4 \\ L_5 \end{array} \right\} II \\
 \left. \begin{array}{l} L_6 \\ L_7 \end{array} \right\} III \\
 \left. \begin{array}{l} L_8 \\ L_9 \\ L_{10} \\ L_{11} \end{array} \right\} IV
 \end{array} \right.$$

Роды стеколъ.

I. Почти полушарообразная линза L_1 , у которой диаметръ свободнаго отверстiя $2h = 1,7$, состоитъ изъ стекла подъ названiемъ:

Schwerstes Baryt-Crown:

$$n_D = 1,6112, \quad n_F - n_C = 0,01068.$$

II. $2h = 4,30, L_2$ Silikat-Flint:

$$n_D = 1,6202, \quad n_F - n_C = 0,01709,$$

L_3 Silikat-Crown:

$$n_D = 1,5134, \quad n_F - n_C = 0,00859$$

III. Простой менискъ, L_4 Boro-Silikat-Crown:

$$n_D = 1,5100, \quad n_F - n_C = 0,00797$$

IV. $2h = 6,1$

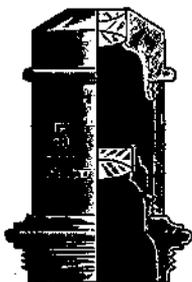
$$L_5 = L_2 \quad L_6 = L_3 \quad L_7 = L_2$$

Всѣ протяженія выражены въ миллиметрахъ.

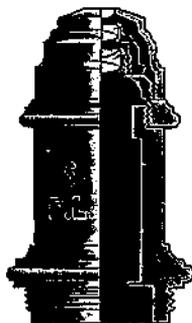
Апохроматы готовятся по такому же образцу, какъ на чертежѣ (фиг. 93) или (фиг. 92) съ тою только разницею, что одна или нѣсколько линзъ изъ кропгласа замѣняются линзами изъ плавниковаго шпата (Flusspath), для котораго показатели преломленія такіе:

$$n_C = 1,49254; \quad n_D = 1,4938; \quad n_F = 1,49709; \quad n_G = 1,49982; \quad n_H = 1,44204;$$

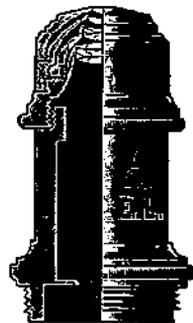
$$\text{такъ что } n_F - n_C = 0,00455 \text{ и } \nu = 1 : \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} = 95,4.$$



фиг. А



фиг. В



фиг. С.

Рисунки (фиг. А, В и С) представляют образцы оправъ микроскопическихъ объективовъ.

Фотографическіе объективы.

§ 50. **Опредѣленіе.** Фотографическій объективъ есть собирательная система, благодаря которой на матовомъ стеклѣ фотографическаго аппарата (камеры-обскуры) получается изображеніе отъ предмета, находящагося внѣ этого аппарата передъ объективомъ.

Прежде, чѣмъ описывать устройство фотографическаго объектива, мы познакомясь съ глубиною изображенія и свѣтосилою фотографическаго объектива.

§ 51. **Глубина изображенія.** Глубина изображенія (глубина фокуса)—это свойство объектива давать отчетливыя изображенія предметовъ, расположенныхъ на различныхъ расстоянїяхъ отъ объектива.

Въ § 18 для оптической системы мы вывели формулу

$$xx' = FF',$$

которая въ примененїи къ фотограф. объективу переписывается такъ:

$$xx' = -F^2 \quad \dots \quad (88)$$

Это потому, что для фотографич. объектива первая и послѣдняя средины одинаковы и каждая изъ нихъ есть ничто иное, какъ воздухъ и слѣдовательно на основанїи формулы (43)—§ 19 имѣемъ:

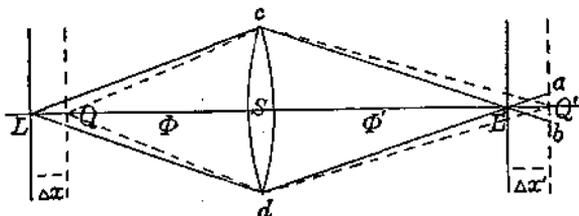
$$F = -F'.$$

Формула (88) даетъ возможность опредѣлить мѣсто изображенія, если дано мѣсто предмета и обратно. При этомъ надо помнить, что x выражаетъ расстояние предмета отъ перваго фокуса, а x' —расстояние изображенія отъ втораго фокуса § 18.

Изъ формулы (88) находимъ, что

$$x' = -\frac{F^2}{x}.$$

Если x очень велико, то x' близко къ нулю, иными словами: если предметъ находится довольно далеко отъ объектива, то изображеніе почти въ фокусѣ. Вообще опытъ показываетъ, что если расстоянїя предметовъ отъ объектива превосходятъ 100 фокусныхъ расстоянїй послѣдняго, то изображенія этихъ предметовъ располагаются почти въ одной и той же плоскости, проходящей черезъ фокусъ. Очевидно упомянутое предѣльное расстояние $100F$ будетъ тѣмъ мень-



фиг. 94.

ше, чѣмъ меньше F . Поэтому уже на основанїи этихъ общихъ замѣчанїй можно видѣть, что тотъ объективъ глубже работаетъ, у котораго фокусное расстояние меньше. Но не бесполезно будетъ выве-

сти формулу, выражающую мѣру глубины изображенія. Пусть на чертежѣ (фиг. 94) S изображаетъ пѣкоторую оптическую систему, съ фокусами Φ и Φ' , и пусть, благодаря этой системѣ двѣ предметныя плоскости L и Q изображаются соответственно въ видѣ плоскостей L' и Q' . Лучи, выходящіе изъ точки L , по выходѣ изъ системы S собираются въ точкѣ L' и идя дальше, расходятся, образуя въ плоскости Q' пѣкоторый свѣтлый кружочекъ ab . Нѣчто подобное будетъ происходить и съ лучами, выходящими изъ остальныхъ точекъ плоскости L . Отъ этого произойдетъ то, что въ то время, какъ предметъ, расположенный въ плоскости Q , отчетливо изображается въ плоскости Q' , предметъ, расположенный въ плоскости L , не будетъ изображаться отчетливо, ибо каждой точкѣ его будетъ отвѣчать въ плоскости Q' не сопряженная точка, а пѣкоторый свѣтлый кружокъ въ родѣ кружка ab . Понятно, чѣмъ этотъ кружокъ будетъ меньше, тѣмъ отчетливѣе будетъ изображеніе въ плоскости Q' предмета, расположеннаго въ плоскости L .

Изъ подобныхъ треугольниковъ $aL'b$ и $cL'd$ находимъ:

$$\frac{ab}{cd} = \frac{L'Q'}{SL'}$$

Вводимъ такіа обозначенія:

$$\begin{aligned} cd \text{ (діаметръ отверстія системы)} &= D \\ ab \text{ (діаметръ упомянутаго кружка)} &= z \\ LQ &= \Delta x \\ L'Q' &= \Delta x'. \end{aligned}$$

Кромѣ того замѣтимъ, что $\Phi'L' = x'$ и $S\Phi' = -F' = F$; слѣдов. $SL' = F + x'$.

Тогда выведенная нами пропорція переписнется такъ:

$$\frac{z}{D} = \frac{\Delta x'}{F + x'} \dots \dots \dots (I)$$

Предполагая, что Δx очень мало въ сравненіи съ x и вспомниная сказанное въ § 20, мы можемъ написать

$$\frac{\Delta x'}{\Delta x} = -\frac{FF'}{x^2} = \frac{F^2}{x^2} \text{ или } \Delta x' = \frac{F^2}{x^2} \cdot \Delta x.$$

Найденное выраженіе для $\Delta x'$ вставимъ въ равенство (I), тогда получимъ:

$$z = \frac{D \cdot F^2}{(F + x') x^2} \Delta x.$$

Исключивъ въ послѣднемъ выраженіи x' съ помощью уравненія (88), найдемъ, что

$$z = \frac{D \cdot F}{x(x-F)} \Delta x = \frac{D \cdot F}{x \cdot x \left(1 - \frac{F}{x}\right)} \Delta x.$$

Если F очень мало въ сравненіи съ x , то въ послѣднемъ выраженіи величиною $\frac{F}{x}$ можно пренебречь и для z получимъ такое выраженіе:

$$z = \frac{D \cdot F}{x^2} \Delta x.$$

Чѣмъ z меньше, тѣмъ глубина изображенія больше и мы за мѣру глубины изображенія примемъ величину $\frac{1}{z}$; поэтому, обозначивъ глубину изображенія черезъ Γ , напишемъ

$$\Gamma = \frac{1}{z} = \frac{x^2}{D \cdot F} \cdot \frac{1}{\Delta x}$$

или

$$\Gamma = \frac{1}{D \cdot F} \cdot \frac{1}{\Delta x} \cdot x^2 \dots \dots \dots (89)$$

или

$$\Gamma = \frac{1}{\left(\frac{D}{F}\right) \left(\frac{F}{x}\right)^2} \cdot \frac{1}{\Delta x} \dots \dots \dots (90)$$

Отношеніе $\frac{D}{F}$ называется свѣтосилою фотографич. объектива, а $\frac{F}{x}$ согласно § 20 представляет собою поперечное увеличеніе $\frac{y'}{y}$.

Формула (89) приводитъ къ такому заключенію:

1. Глубина Γ обратно пропорціональна діаметру отверстія и фокусному разстоянію объектива, но прямо пропорціональна квадрату разстоянія предмета.

Формула же (90) даетъ такіе выводы:

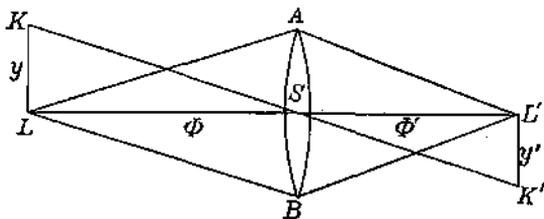
2. При одинаковой свѣтосилѣ $\frac{D}{F}$, но неодинаковомъ фокусномъ разстояніи F двѣ системы работаютъ одинаково глубоко, если поперечное увеличеніе $\frac{y'}{y} = \frac{F}{x}$ у обѣихъ системъ одинаково.

3. При одинаковой свѣтосилѣ $\frac{D}{F}$ и одинаковомъ разстояніи x , но неодинаковомъ фокусномъ разстояніи F глубина Γ измѣняется обратно пропорціонально квадрату фокуснаго разстоянія F .

Величина $\frac{1}{D.F}$, входящая множителемъ въ выраженіе (89), служитъ мѣрою глубины объектива.

§ 52. **Свѣтосила фотографическаго объектива и значеніе диафрагмы.** Посмотримъ, отъ чего зависитъ напряженность свѣта на изображеніи (свѣтосила изображенія*), при чемъ рассмотримъ два случая: когда свѣтящійся предметъ есть точка и когда предметъ представляетъ свѣтящуюся плоскость.

1. случай. Пусть предметомъ служитъ свѣтящаяся точка L (фиг. 95), для которой система S даетъ изображеніе L' . Значитъ, весь свѣтъ, идущій изъ L и попадающій на поверхность системы AB , но выходя изъ нея устремляется въ L' . Поэтому напряженіе свѣта



фиг. 95.

(свѣтовая энергія) въ точкѣ L' зависитъ очевидно отъ количества свѣта, падающаго на поверхность AB изъ точки L , а это количество въ свою очередь пропорціонально поверхности AB и обратно пропорціонально квадрату разстоянія L отъ этой поверхности. Обозначивъ діаметръ отверстія системы черезъ D , а разстояніе точек L отъ поверхности системы черезъ d , мы скажемъ, что напряженіе свѣта въ точкѣ L' пропорціонально выраженію $\frac{D^2}{d^2}$, т. е. *напряженіе свѣта въ точкѣ L' или свѣтосила ея прямо пропорціональна квадрату діаметра отверстія системы и обратно пропорціональна квадрату разстоянія предмета отъ системы, а отъ фокуснаго разстоянія не зависитъ.*

2. Случай. Пусть теперь предметъ представляетъ собою нѣкоторую свѣтящуюся поверхность, которой линейныя размѣры выражаются прямою $KL = y$ (фиг. 95), а соответственныя линейныя размѣры изображенія пусть выражаются прямою $K'L' = y'$. Обозначимъ поверхность предмета черезъ Q , а изображенія черезъ Q' . Количество свѣта, доходящее черезъ систему S отъ предмета до изображенія его, пропорціонально поверхности отверстія AB системы S или квадрату діаметра его, обратно пропорціонально квадрату раз-

*) Здѣсь неудобно употреблять терминъ „яркость“ изображенія, потому что въ фотографіи имѣется въ виду изображеніе, вызываемое химическими лучами, которые могутъ быть даже незамѣтными для глаза.

стояція d предмета отъ поверхности AB системы S и прямопропорціо-
нально поверхности предмета, т. е. количество свѣта, доходящее отъ
предмета до изображенія его, пропорціоально величинѣ

$$\frac{Q \cdot D^2}{d^2}.$$

Этотъ свѣтъ распредѣляется по всему изображенію и чѣмъ боль-
ше изображеніе, тѣмъ меньше свѣта приходится на каждую единицу
поверхности изображенія. Поэтому количество свѣта, приходящееся
на единицу поверхности изображенія, обратно пропорціоально поверх-
ности изображенія, и окончательно находимъ, что оно пропорціо-
нально величинѣ

$$\frac{Q \cdot D^2}{Q' \cdot d^2}$$

Эту величину и примемъ за мѣру напряженія свѣта на изоб-
раженіи.

Но такъ какъ изображеніе до нѣкоторой степени подобно пред-
мету, то мы можемъ принять (по крайней мѣрѣ для ортоскопическихъ
системъ), что

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{y^2}{y'^2}$$

и въ такомъ случаѣ напряженіе свѣта на изображеніи выразится такъ:

$$J = \left(\frac{y}{y'} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^2,$$

Но $\frac{y}{y'} = \frac{x}{F}$ и $xx' = -F^2$, гдѣ $x = -\Phi L$ и $x' = \Phi' L'$;

поэтому

$$d = LS = L\Phi + \Phi S = -x + F$$

и

$$J = \left(\frac{x}{F} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{d} \right)^2 = \left(\frac{x}{d} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{F} \right)^2 = \left(\frac{x}{-x + F} \right)^2 \cdot \left(\frac{D}{F} \right)^2.$$

Если F незначительно въ сравненіи съ x , то получимъ:

$$J = \left(\frac{D}{F} \right)^2.$$

Такимъ образомъ для изображенія плоскаго предмета имѣемъ
такіе выводы:

1. *Напряженіе свѣта на изображеніи не зависитъ отъ раз-
стоянія предмета.*

2. *Напряженіе свѣта на изображеніи прямо пропорціоально-
но квадрату діаметра отверстія и обратно пропорціоально*

квадрату фокуснаго разстоянія объектива, короче: пропорционально квадрату относительнаго отверстія объектива.

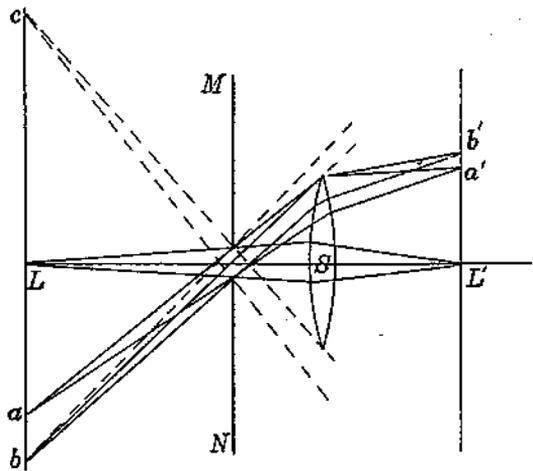
Конечно, эти выводы только приближительные.

Велчина $\left(\frac{D}{F}\right)^2$ служитъ мѣрою свѣтосилы фотографическаго объектива.

Замѣтимъ, что подъ отверстіемъ объектива вообще надо понимать *действующее* отверстіе его или иначе *входный зрачекъ*, о которомъ будетъ рѣчь въ § 65.

До сихъ поръ мы предполагали, что свѣтъ равномерно распределяется по поверхности изображенія. Но такое распределеніе свѣта

не всегда имѣетъ мѣсто и иногда свѣтъ распространяется на изображеніи неравномѣрно, хотя бы даже самъ предметъ былъ освѣщенъ равномерно. На чертежѣ (фиг. 96) можно объяснить такой случай. Передъ объективомъ, который на чертежѣ изображенъ для простоты въ видѣ одной линзы S , помѣщена діафрагма MN . Непосредственно изъ чертежа видно, что изъ предметныхъ точекъ, разстояніе кото-



фиг. 96.

рыхъ отъ оси не превышаетъ длины La , доходитъ до соответственныхъ сопряженныхъ съ ними точекъ изображенія почти одинаковое количество свѣта. Напр. изъ точки L доходитъ до точки L' почти столько же свѣта, сколько изъ точки a до сопряженной съ нею точки a' . Но если мы будемъ брать точки, дальше отстоящія отъ оси, чѣмъ a , то мы легко можемъ замѣтить на самомъ же чертежѣ, что свѣтъ, выходящій изъ такихъ точекъ (напр. изъ b) и проникающій черезъ діафрагму, не весь доходитъ до изображенія, и чѣмъ точка дальше отъ оси, тѣмъ меньше свѣта доходитъ до изображенія этой точки. Наконецъ, изъ точекъ, отстоящихъ отъ оси дальше точки c , свѣтъ, совсѣмъ не будетъ доходить до поверхности изображенія и эти точки совсѣмъ не изобразятся. Отсюда заключаемъ, что только та часть предмета, которая представляется въ видѣ круга съ центромъ въ L и радиусомъ La , изобразится съ равномернымъ (менѣе болѣе) распределеніемъ свѣта, а точки, лежащія внѣ этого круга,

будутъ изображаться слабѣе и тѣмъ слабѣе, чѣмъ дальше онѣ отстоятъ отъ оси. Поэтому во время экспозиціи (фотографированія) для той части предмета, которая содержится внутри упомянутого круга, можетъ наступить передержка, тогда какъ края изображенія будутъ обнаруживать недодержку.

Легко сообразить, что чѣмъ меньше будетъ отверстіе діафрагмы, тѣмъ большая часть предмета можетъ дать изображеніе съ равномернымъ распредѣленіемъ свѣта и если бы отверстіе діафрагмы представляло собою точку, то въ этомъ идеальномъ случаѣ даже обширный предметъ давалъ бы изображеніе съ равномернымъ распредѣленіемъ свѣта. Но не надо упускать изъ виду, что уменьшеніе отверстія діафрагмы влечетъ за собою удлинненіе экспозиціи.

Изъ всего того, что говорилось до сихъ поръ о діафрагмахъ, видно, что онѣ играютъ весьма важную роль въ фотографическихъ объективахъ. При помощи ихъ можно уменьшить такіе недостатки, какъ сферическая аберрація, астигматизмъ § 37, искривленіе поверхности изображенія § 37, кома § 38. Кроме того при помощи діафрагмы можно увеличить глубину изображенія, такъ какъ діафрагмою можно уменьшить дѣйствующее отверстіе объектива; а изъ того, что мы говорили въ этомъ параграфѣ, слѣдуетъ, что діафрагмою можно увеличить поле съ равномернымъ распредѣленіемъ свѣта. Вообще съ уменьшеніемъ отверстія діафрагмы отчетливое поле съ равномернымъ распредѣленіемъ свѣта увеличивается. Потому мы увидимъ, что располагая двѣ одинакія линзы симметрично относительно діафрагмы, можно сдѣлать систему ортоскопическою.

Главнѣйшіе типы фотографическихъ объективовъ.

§ 53. **Общая замѣчанія.** Къ фотографическимъ объективамъ предъявляются слѣдующія требованія:

1. Устраненіе сферической аберраціи.
2. Устраненіе хроматической абер. Сюда относится и требованіе совпаденія химическаго фокуса съ оптическимъ.
3. Соблюденіе условія синусовъ.
4. Устраненіе астигматизма.
5. Изображеніе должно быть подобно предмету (ортоскопія).
6. Поверхность изображенія должна быть плоскою.
7. Свѣтъ долженъ равномерно распредѣляться по всей поверхности изображенія предмета, равномерно освѣщеннаго.
8. Фотографическій объективъ долженъ быть свѣтосильнымъ.
9. Объективъ долженъ имѣть определенное фокусное разстояніе.

Устроить такой фотографич. объективъ, который бы удовлетворялъ всёмъ перечисленнымъ требованіямъ безъ исключенія, — невозможно; потому что нѣкоторыя изъ упомянутыхъ требованій иногда несомѣстны. Приходится при устройствѣ опредѣленнаго фотографическаго объектива обращать главное вниманіе только на нѣкоторыя требованія, а какія—это зависитъ отъ того, для какой цѣли предназначается объективъ. Отсюда и произошли разные типы фотогр. объективовъ. Портретные объективы, предназначенные для моментальныхъ снимковъ, должны обладать громадною свѣтосилою и дѣйствующее отверстіе ихъ должно быть значительное; поэтому при устройствѣ такихъ объективовъ слѣдуетъ обращать главное вниманіе на устраненіе сферической аберраціи, быстро возрастающей съ увеличеніемъ отверстия, и на соблюденіе условія синусовъ. При соблюденіи этихъ условій объективъ является апланатическою системою § 35 и по крайней мѣрѣ весьма малая часть плоскости изобразится такою системою въ видѣ плоскости, при чемъ будутъ дѣйствовать широкіе пучки свѣта и изображеніе будетъ свѣтосильнымъ.

Замѣтимъ, что такъ какъ при полученіи портретовъ, предметъ во время экспозиціи находится довольно далеко отъ объектива, то условіе синусовъ при вычисленіи портретнаго объектива можно выразить формулою

$$\frac{h}{\sin w'} = \text{const.} \quad (\S 35)$$

Если фотогр. объективъ предназначается для полученія изображеній весьма обширныхъ предметовъ, то въ такомъ случаѣ изображеніе надо производить при помощи узкихъ пучковъ свѣта, которые при значительной обширности предмета могутъ быть наклонены подъ значительными углами къ оси и поэтому могутъ вызывать астигматизмъ § 36; слѣдовательно объективы, предназначенные для фотографированія обширныхъ предметовъ, прежде всего должны быть свободны отъ астигматизма. Но съ устраненіемъ астигматизма не всегда устраняется искривленіе поверхности изображенія. Если объективъ предназначенъ для группъ, то послѣдній недостатокъ еще можетъ быть терпимъ, потому что группу лицъ можно такъ расположить, что изображеніе ея будетъ въ плоскости, хотя бы даже оно было достаточно обширное.

Если же объективъ предназначается для съемки архитектурныхъ зданій или репродукцій, то въ такомъ объективѣ необходимо устранить не только астигматизмъ, но и искривленіе поверхности изображенія и кромѣ того слѣдуетъ сдѣлать такой объективъ ортоскопическимъ.

Значитъ, при устройствѣ широкоугольниковъ, обнимающихъ большой уголъ зрѣнія, нужно бороться главнымъ образомъ съ таки-

ми недостатками, какъ астигматизмъ, искривленіе поверхности изображенія и отсутствіе подобія (дисторція). Если бы мы пожелали сдѣлать широкоугольнымъ возможности свѣтосильнымъ, то къ перечисленнымъ недостаткамъ присоединился бы еще недостатокъ „кома“ § 38.

Если фотографическіе объективы теперь и доведены до высокаго совершенства, то не надо забывать, что это достигнуто не сразу, а въ теченіе продолжительнаго времени благодаря трудамъ многихъ лицъ. Устройство хорошаго объектива чрезвычайно утомительная работа. Въ этомъ дѣлѣ люди шли путемъ продолжительныхъ теоретическихъ и эмпирическихъ изысканій. Отчасти черченіемъ, отчасти тригонометрическими вычислениями изучали ходъ лучей въ различныхъ комбинаціяхъ линзъ, испытывали качества уже готовыхъ линзъ и системъ. Если оказывались существенные недостатки въ изготовленныхъ системахъ, то старались узнать, отчего зависятъ эти недостатки и затѣмъ старались или уничтожить ихъ или по крайней мѣрѣ ослабить. Каждый оптикъ, обладающій соответствующими знаніями, можетъ продолжительными изысканіями найти способъ изготовить оптическую систему, отличающуюся особыми качествами и преимуществами среди другихъ системъ такого же типа, и даетъ своей системѣ особое названіе сообразно съ выдающимися качествами ея. Этимъ объясняется, почему существуетъ такая масса названій объективовъ для фотографіи.

Мы еще не упоминали объ одномъ недостаткѣ, съ которымъ оптикамъ приходится считаться при устройствѣ фотогр. объективовъ. Это такъ называемое *центральное пятно*. Оно отчасти объясняется отраженіемъ свѣта отъ поверхностей линзъ, входящихъ въ составъ объектива. Мы не будемъ входить въ подробности по поводу этого недостатка тѣмъ болѣе, что объ немъ говорится въ руководствахъ по фотографіи. Скажемъ только, что и этотъ недостатокъ удается устранить.

§ 54. **Ахроматъ (старый и новый)**. Фотографическій объективъ, составленный изъ двухъ склеенныхъ линзъ изъ разныхъ веществъ, часто называется *ахроматомъ*.

Ахроматизація фотографическихъ объективовъ производится обыкновенно по отношенію лучей D и G' . Это дѣлается съ тою цѣлью, чтобы видимое изображеніе (наблюдаемое глазомъ) по возможности совпадало съ изображеніемъ, воспроизводимымъ химическими лучами (дѣйствующими на чувствительную фотографическую пластинку).

Въ ахроматѣ одна линза собирающая, а другая рассеивательная.

Первые приближенные значения радиусовъ для ахромата находятся по формуламъ (80) или (82); но только надо помнить, что въ данномъ случаѣ надо вмѣсто $n_F - n_C$ взять $n_G' - n_D$ и слѣдовательно принять:

$$v = \frac{n_D - 1}{n_G' - n_D}$$

Различаютъ два рода ахроматовъ: *старые* и *новые*. Старый ахроматъ составленъ изъ старыхъ стеколъ и собирательная линза въ немъ изъ кронгласа, а разсѣивательная изъ флинтгласа. Въ составъ же новаго ахромата входятъ новыя стекла. Въ концѣ § 48 мы указали разницу между старыми и новыми стеклами. Новый ахроматъ рѣзко отличается отъ стараго тѣмъ, что вещество собирательной линзы въ новомъ ахроматѣ, обладая меньшею дисперсіею, чѣмъ вещество разсѣивательной линзы, обладаетъ зато ббльшею способностью преломлять, чѣмъ вещество разсѣивательной линзы, тогда какъ въ старомъ ахроматѣ вещество собирательной линзы, обладая меньшею дисперсіею, обладаетъ и меньшею способностью преломлять сравнительно съ веществомъ разсѣивательной линзы. Пара стеколъ, входящихъ въ составъ стараго ахромата, называется *нормальною парюю*, а входящихъ въ составъ новаго ахромата—*аномальною парюю*.

Достоинство новыхъ ахроматовъ то, что они даютъ изображение въ значительной степени свободное отъ искривленія поверхности и это выпрямленіе поверхности изображения въ данномъ случаѣ достигается именно только выборомъ родовъ стеколъ. Выяснимъ это

Пецваль вывелъ формулу, которую въ примѣненіи къ ахромату можно представить такъ:

$$-\frac{1}{R} = \frac{1}{n_1 F_1} + \frac{1}{n_2 F_2},$$

гдѣ

- R радиусъ кривизны изображения, даваемого ахроматомъ,
- n_1 показатель преломленія вещества собирает. линзы,
- F_1 фокусное разстояніе собирательной линзы,
- n_2 показатель преломл. вещества разсѣиват. линзы,
- F_2 фокусное разстояніе разсѣив. линзы.

Въ этомъ параграфѣ подъ фокуснымъ разстояніемъ будемъ понимать *первое* фокусное разстояніе.

Чтобы поверхность изображения была плоскою, очевидно необходимо условіе $R = \infty$ и тогда формула Пецваля даетъ

$$\frac{1}{n_1 F_1} + \frac{1}{n_2 F_2} = 0$$

откуда

$$n_1 F_1 = -n_2 F_2 \quad (91)$$

Докажемъ, что въ старомъ ахроматѣ означенное условіе не можетъ быть соблюдено. Для этой цѣли прежде всего докажемъ, что для ахромата (старого и новаго) имѣеть мѣсто неравенство

$$F_1 < -F_2$$

Въ самомъ дѣлѣ, обозначивъ фокусное разстояніе ахромата черезъ F , мы можемъ на основаніи § 33 написать:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} \quad (66)$$

Такъ какъ собирательная система имѣеть положительное фокусное разстояніе, а разбѣивательная — отрицательное § 28, то

$$F_1 > 0 \text{ и } F_2 < 0 ;$$

а такъ какъ ахроматъ представляетъ собирательную систему, то необходимо, чтобы имѣло мѣсто неравенство

$$F > 0$$

или

$$\frac{1}{F_1} + \frac{1}{F_2} > 0 ,$$

что возможно только при условіи, что

$$F_1 < \text{абс. вел. } F_2$$

или

$$F_1 < -F_2 .$$

Такимъ образомъ для стараго ахромата мы имѣемъ неравенства

$$\begin{aligned} n_1 &< n_2 \\ \text{и} \\ F_1 &< -F_2 , \end{aligned}$$

а въ такомъ случаѣ условіе (91) не можетъ имѣть мѣста.

Для новаго же ахромата имѣемъ такія неравенства:

$$\begin{aligned} n_1 &> n_2 \\ \text{и} \\ F_1 &< -F_2 , \end{aligned}$$

при которыхъ условіе (91) возможно.

Выбравъ вещества для новаго ахромата, мы должны вычислить радіусы съ такимъ расчетомъ, чтобы по возможности лучше устранить хроматическую и сферич. aberr., тѣмъ болѣе, что условіе Пецваля (91) применимо лишь въ случаѣ, когда изображеніе происходитъ

точкообразно, т. е. лучи, вышедшие из любой точки предмета, опять собираются в некоторой точке изображения.

Изъ равенства (91) слѣдуетъ:

$$\frac{F_1}{F_2} = -\frac{n_2}{n_1},$$

по для ахроматизации необходимо условие

$$\frac{F_1}{F_2} = -\frac{\nu_2}{\nu_1} \dots \dots \dots (91a)$$

$$\text{гдѣ } \nu = \frac{n_D - 1}{n_G' - n_D}.$$

Отсюда получаемъ равенство

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\nu_2}{\nu_1} \dots \dots \dots (92)$$

Такому условию должна удовлетворять пара стеколъ, чтобы изъ нихъ можно было устроить ахроматъ, для котораго соблюдались бы условія (91) и (91a).

Такой пары стеколъ, которая удовлетворяла бы условию (92) вполне, конечно не существуетъ; но можно подыскать такую пару, которая по крайней мѣрѣ приблизительно удовлетворяетъ означенному условию, напр.

№ 16 Schweres Barium-Silicat-Crown

№ 73 Baryt-Leichtflint

Хотя эта пара стеколъ оказалась бы неподходящею на практикѣ, если бы мы изъ нихъ захотѣли приготовить ахроматъ съ короткимъ фокуснымъ расстояніемъ. Вообще на практикѣ по необходимости нѣсколько отступаютъ отъ усл. (92) или лучше сказать, отъ условія (91), лишь бы только удовлетворить другимъ не менѣ важнымъ условіямъ, иначе говоря, на практикѣ не стремятся сдѣлать радіусъ кривизны поверхности изображенія безконечно большимъ, а ограничиваются тѣмъ, что дѣлаютъ его достаточно большимъ.

Ахроматъ въ оправѣ, снабженный диафрагмою, представляетъ простой объективъ (фиг. 97). Какъ примѣръ простого объектива, приводимъ ландшафтный объективъ Буша.

Ландшафтный объективъ Буша.

$$F = 813,2 \text{ mm, } ^*)$$

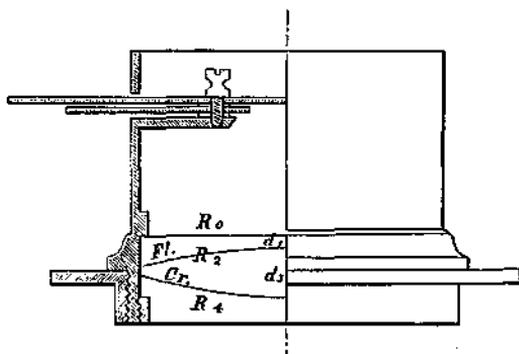
$$2h = 52,2$$

*) Численныя данныя для конструкціи фотограф. объективовъ за малыми исключеніями взяты изъ сочиненія Гляйхена, о которомъ упоминалось на стр. 150.

Разстояніе передней діафрагмы отъ первой линзы 40 мм.

Относит. отверстіе почти $\frac{1}{15}$.

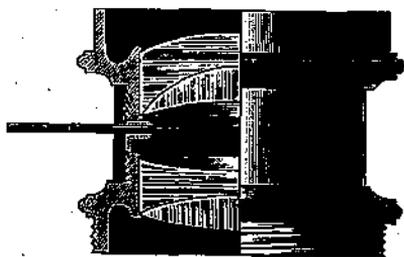
$$\left. \begin{array}{l} R_0 = \infty \\ d_1 = 2,8 \\ R_2 = 99,2 \\ d_3 = 9 \\ R_4 = -85,6 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Flint } n_D = 1,6027 \\ \text{Crown } n_D = 1,5282 \end{array}$$



фиг. 97.

Оправа (фиг. 97) соответствует простому объективу Герца.

§ 55. Анастигматы. П. Рудольфъ, соединяя старый ахроматъ съ новымъ, устроилъ систему, свободную отъ астигматизма и дающую плоское изображеніе (фиг. 98). Такой объективъ называется вообще анастигматомъ. Въ конструкціи этого объектива характерно то, что поверхность, по которой склеены линзы одного ахромата, собирательная (дѣйствуетъ, какъ собирает. линза), а поверхность, по которой склеены линзы другого ахромата, разсѣивательная (дѣйствуетъ, какъ разсѣиват. линза).



фиг. 98.

Оказывается, что при такихъ условіяхъ поверхность склейки старого ахромата и такая же поверхность новаго ахромата въ отношеніи астигматизма вызываютъ дѣйствія, обратныя другъ другу.

Что же касается выпрямленія поверхности изображенія, то оно достигается, благодаря присутствію въ системѣ новаго ахромата. Ниже помѣщены данныя для конструкціи одного изъ анастигматовъ такого же типа, какъ на чертежѣ (фиг. 98).

Широкоугольный быстроработаящий анастигматъ (дублетъ). Серия IV; 1:12 (фиг. 100).

Фокусное разстояніе объектива $F=100$.

Диаметръ отверстія линзъ $D=10$.

Радиусы:

$$\begin{aligned} r_1 &= +15,31; & r_2 &= -20,41; \\ r_3 &= +6,53; & r_4 &= +19,18; \\ r_5 &= +17,04; & r_6 &= -19,18. \end{aligned}$$

Толщина стеколъ:

$$\begin{aligned} d_1 &= 1,94; \\ d_2 &= 2,35; \\ d_3 &= 1,12; \\ d_4 &= 1,74. \end{aligned}$$

Разстояніе діафрагмы:

$$\begin{aligned} b_1 &= 2,04 \\ b_2 &= 2,45 \end{aligned}$$

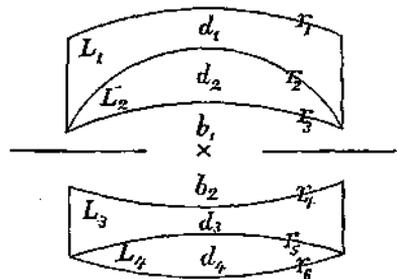
Роды стеколъ (для n_D)

$$\begin{aligned} L_1 \text{ Baryt-Flint } n_D &= 1,56814; & L_3 \text{ Leicht-Flint } n_D &= 1,52150; \\ L_2 \text{ Silicat-Crown } n_D &= 1,52197; & L_4 \text{ Barium-Crown } n_D &= 1,57360. \end{aligned}$$

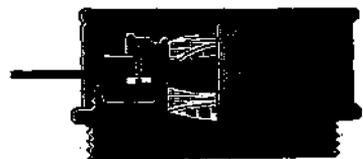
Этотъ объективъ при хорошемъ освѣщеніи можетъ служить для моментальныхъ снимковъ на открытомъ воздухѣ. Онъ достаточно ортоскопиченъ и годенъ для съемки зданій. При маломъ отверстіи діафрагмы обнимаемый имъ уголъ достигаетъ 90° . Такимъ образомъ этотъ объективъ можно признать универсальнымъ.

Анастигматы вообще отличаются необыкновенною равномерностью въ рѣзкости изображенія при значительной обширности послѣдняго.

По принципу П. Рудольфа были построены такъ называемыя *анастигматлинзы* (фиг. 101), (фиг. 102) и (фиг. 103). Объективъ (фиг. 101) состоитъ изъ четырехъ линзъ скленныхъ вмѣстѣ, отличается значительною свѣтосилою и даетъ изображеніе отчетливое, свободное отъ астигматизма (анастигматичное) и плоское. Собственно, объективъ (фиг. 101) можно разсматривать, какъ два ахромата: старый и новый, скленные вмѣстѣ, при чемъ и здѣсь принципъ П. Рудольфа выражается въ томъ, что поверхность склейки въ одномъ ахроматѣ должна быть



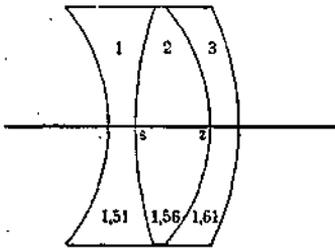
фиг. 99.



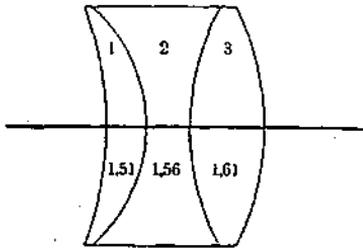
фиг. 100.



фиг. 101.



фиг. 102.



фиг. 103.

разсѣивательною, а въ другомъ—собира-
тельной.

Что же касается объектива (фиг. 102),
то его можно разсматривать, какъ ре-
зультатъ замѣны въ объективѣ (фиг. 101)
двухъ среднихъ линзъ одною линзою
съ показателемъ преломленія, предста-
вляющимъ среднюю величину между по-
казателями преломл. наружныхъ линзъ.

Объективы (фиг. 102) и (фиг. 103)
тоже принадлежатъ къ анастигматамъ
съ двумя различно дѣйствующими повер-
хностями склейки (s —собирающая,
а z —разсѣивательная), т. е. п для
нихъ принципъ П. Рудольфа имѣетъ
мѣсто. Оказывается, что принципъ
П. Рудольфа можетъ соблюдаться, какъ
въ случаѣ, когда средняя линза собира-

тельная, а наружныя—разсѣивательныя (фиг. 102), такъ и въ случаѣ,
когда—обратно: средняя линза разсѣивательная, а наружныя—соби-
рательныя (фиг. 103). Но на практикѣ удобнѣе приготовить послѣд-
нюю систему (фиг. 103) и для такой системы мы подаемъ ниже данныя:

Анастигматлинза.

$$F_D = 100,$$

относительное отверстіе $\frac{1}{14,4}$,

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = -14,2 \\ d_1 = 1,7 \\ r_2 = -5,5 \\ d_2 = 0,5 \\ r_3 = 20,7 \\ d_3 = 1,4 \\ r_4 = -12,6 \end{array} \right\} \begin{array}{l} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{array}$$

Застояніе передней діафрагмы отъ первой преломляющей по-
верхности 10 мм.

Роды стеколъ:

L_1 первая линза: Silicat-Crown $n_D = 1,52246$, . . . $\bar{v} = 46,4$

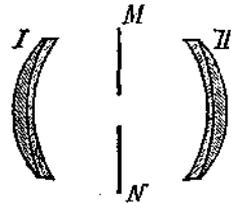
L_2 вторая линза: Baryt-Leichtflint $n_D = 1,56724$, $\bar{v} = 41,5$

L_3 третья линза: Schwerstes Baryt-Crown $n_D = 1,6112$, $\bar{v} = 44,8$

$$\text{гдѣ } \bar{v} = \frac{n_D - 1}{n_{G'} - n_D}$$

§ 56. **Двойные симметрическіе объективы (Апланаты).** Двойной симметрической объективъ или апланатъ состоитъ изъ двухъ одинаковыхъ системъ *I* и *II* въ видѣ менисковъ обращенныхъ другъ къ другу своими вогнутыми сторонами и симметрично расположенныхъ относительно середины діафрагмы (фиг. 104). Благодаря симметричности, означенный объективъ обладаетъ слѣдующими преимуществами:

1. Онъ представляетъ систему ортоскопическую.
2. Въ немъ удалось уничтожить не только хроматическую разницу мѣста, но и хроматическую разницу увеличенія (§ 42).
3. Недостатокъ „кома“ почти совсѣмъ уничтоженъ.

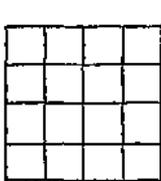


фиг. 104.

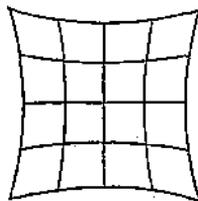
Но надо помнить, что апланатъ вообще не свободенъ отъ астигматизма.

Апланаты уже строились, когда анастигматы еще не были извѣстны. Апланаты строились съ цѣлью получить ортоскопическую систему, дающую изображеніе подобное предмету. Ортоскопичность апланата очень просто объясняется тѣмъ, что діафрагма *MN* (фиг. 104) расположена въ немъ такъ, что по отношенію перваго члена *I* она находится сзади, а по отношенію *II* члена — спереди:

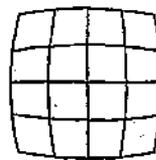
Опытъ показываетъ, что если помѣстить діафрагму сзади линзы, то сѣтка (фиг. а) изобразится линзою въ видѣ, какъ на чертежѣ



фиг. а



фиг. б



фиг. с.

(фиг. б); если же діафрагма будетъ помѣщена передъ линзою, то та же сѣтка (фиг. а) изобразится въ видѣ, какъ на чертежѣ (фиг. с). Лучи, проходя черезъ апланатъ, должны пройти и черезъ систему съ діафрагмою сзади и черезъ систему съ діафрагмою спереди; поэтому такіе лучи претерпятъ противоположныя измѣненія въ отношеніи вліянія ихъ на нарушеніе подобія, проще говоря, лучи, пройдя черезъ апланатъ, должны будутъ дать изображеніе по виду среднее

между изображеніемъ (фиг. в) и изображеніемъ (фиг. с), т. е. они дадутъ правильную сѣтку, подобную предмету (фиг. а).

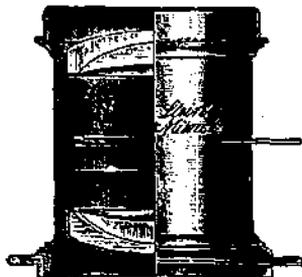
Приводимъ численные данныя для построения апланатовъ Штейнгеля.

Универсальный апланатъ Штейнгеля.

$$F = 1,$$

относительное отверстіе около $\frac{1}{6}$,

обнимаемый уголъ 50°



фиг. 105.

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = 0,246 \\ d_1 = 0,008 \\ r_2 = 0,098 \\ d_2 = 0,017 \\ r_3 = 0,344 \\ \Delta_3 = 0,17 \\ r_4 = -0,344 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Flint } n_D = 1,61507 \\ \text{Crown } n_D = 1,58761 \end{array}$$

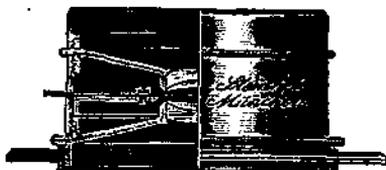
и т. д. симметрично (тѣ же данныя, только въ обратномъ порядкѣ).

Широкоугольный апланатъ Штейнгеля.

$$F = 1,$$

относительное отверстіе $\frac{1}{20}$,

обнимаемый уголъ 90° и болѣе.



фиг. 106.

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = 0,145 \\ d_1 = 0,012 \\ r_2 = 0,065 \\ d_2 = 0,008 \\ r_3 = 0,173 \\ \Delta_3 = 0,017 \\ r_4 = -0,173 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Flint } n_D = 1,61317 \\ \text{L. Flint. } n_D = 1,57709 \end{array}$$

и т. д. симметрично.

Замѣчательно, что въ составъ послѣдняго апланата не входитъ кронгласъ.

§ 57. Анастигматапланатъ. (Двойной симметрической анастигматъ). Конструкція анастигматапланата существенно отличается отъ обыкновеннаго апланата тѣмъ, что входящія въ составъ его отдѣль-

ные члены суть ничто иное, какъ анастигматлины изъ трехъ склеенныхъ вмѣстѣ простыхъ линзъ § 55. (фиг. 107).

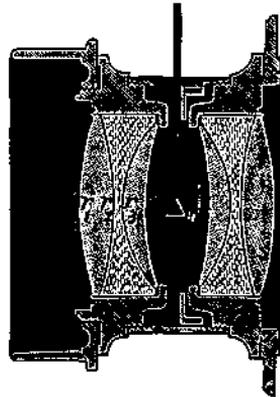
Анастигматопланата соединяетъ въ себѣ всѣ достоинства апланата и анастигмата. Значитъ, это самый совершенный фотографическій объективъ и онъ дѣйствительно представляетъ собою *универсальный* фотогр. объективъ.

$$F = 100,$$

относительное отверстие $\frac{1}{6,75}$.

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = 21,8097 \\ d_1 = 3,6397 \\ r_2 = -33,8187 \\ d_2 = 1,1432 \\ r_3 = 8,5392 \\ d_3 = 2,1986 \\ r_4 = 22,2043 \\ \Delta_4 = 5,4510 \\ r_5 = -22,2043 \end{array} \right\} \begin{array}{l} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{array}$$

и т. д. симметрично.



фиг. 107.

Роды стеколъ:

L_1 Schwerst. Baryt-Crown:	$n_D = 1,6125, n_{G'} = 1,62635$.
L_2 Baryt Leichtflint:	$n_D = 1,5478, n_{G'} = 1,56101$.
L_3 Silicat-Crown:	$n_D = 1,5117, n_{G'} = 1,52266$.

Еще приводимъ данныя для устройства двойного симметрическаго анастигмата, взятыя изъ сочиненія Эдера *) (фиг. 108):

$$F = 240 \text{ mm.}$$

Свободное отверстие линзъ 36 мм.

Наибольшее дѣйствующее отверстие 30 мм.

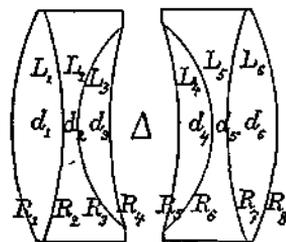
Радиусы:

Толщина стеколъ:

$R_1 = -R_3 = 45,835$	$d_1 = d_5 = 7,334$
$-R_2 = +R_7 = 54,324$	$d_2 = d_6 = 1,833$
$R_3 = -R_5 = 19,858$	$d_3 = d_4 = 4,584$
$R_4 = -R_6 = 49,088$	$\Delta = 11,00$

Всѣ протяженія въ миллиметрахъ.

*) Die Photographischen Objective. Dr. Josef Maria Eder. 1891.



фиг. 108.

Роды стекол:

	n_D	n_G'
$L_1 = L_6$	1,61310	1,62683
$L_2 = L_5$	1,56804	1,58182
$L_3 = L_4$	1,51497	1,52663

Такъ какъ каждая изъ двухъ отдѣльныхъ системъ, входящихъ въ составъ анастигматопланата представляетъ собою астигматически, сферически и хроматически исправленный объективъ, то каждая изъ этихъ системъ можетъ применяться, какъ простой фотографическiй объективъ.

§ 58. **Портретный объективъ.** Чертежъ (фиг. 109) соответствуетъ ниже приведеннымъ даннымъ для конструкции портретнаго объектива.

$$F = 100,$$

$$2h = 29,$$

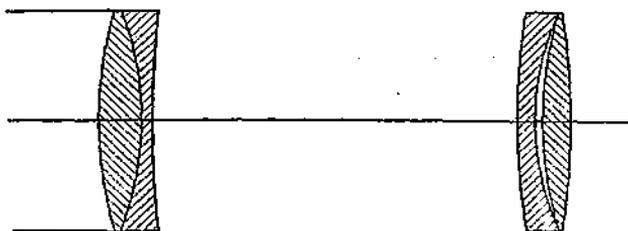
$$\text{Относительное отверстие } \frac{1}{3,4}.$$

$r_1 = 52,9$	}	Hart Crown $n_D = 1,517$
$d_1 = 5,8$		
$r_2 = -41,4$		
$d_2 = 1,5$	}	Leicht Flint $n_D = 1,575$
$r_3 = 436,2$		
$\Delta_3 = 46,6$		
$r_4 = 104,8$	}	Leicht Flint $n_D = 1,575$
$d_4 = 2,2$		
$r_5 = 36,8$		
$\Delta_5 = 0,7$	}	Hart Crown $n_D = 1,517$
$r_6 = 45,5$		
$d_6 = 8,6$		
$r_7 = -149,5$		

Определение въ которыхъ постоянныхъ фот. объектива.

§ 59. **А. Определеiе фокуснаго разстояiя фотогр. объектива.** Радиусомъ равнымъ приблизительно 5 сантим. чертятъ на матовомъ стеклѣ фотографической камеры-обскуры кругъ и такой же величи-

ны кругъ чертятъ на картонѣ. Ставятъ картонъ съ начерченнымъ кругомъ передъ фотографическимъ аппаратомъ на столько далеко, чтобы на матовомъ стеклѣ аппарата можно было получить въ уменьшенномъ видѣ изображеніе круга, начерченного на картонѣ. Затѣмъ



фиг. 109.

начинаютъ по немногу придвигать картонъ къ объективу и всякій разъ, измѣняя надлежащимъ образомъ разстояніе между объективомъ и матовымъ стекломъ, получаютъ на послѣднемъ отчетливое изображеніе круга. Это изображеніе по мѣрѣ приближенія картона будетъ возрастать, пока наконецъ не сдѣлается равнымъ кругу, начерченному на матовомъ стеклѣ и оба круга можно будетъ привести въ полное совпаденіе. Тогда измѣряютъ разстояніе между экраномъ и матовымъ стекломъ, дѣлятъ это разстояніе на 4 и получаютъ въ результатѣ фокусное разстояніе объектива, такъ какъ извѣстно, что когда предметъ находится передъ собирающей линзою на двойномъ фокусномъ разстояніи отъ нея, то изображеніе его находится за линзою такъ же точно на двойномъ фокусномъ разстояніи и такой же величины, какъ предметъ.

§ 60. В. Опредѣленіе дѣйствующаго отверстія объектива.

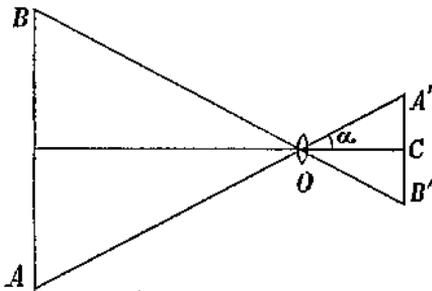
Наводятъ фотографич. аппаратъ на весьма отдаленный предметъ; затѣмъ замѣняютъ матовое стекло картономъ или металлическимъ листомъ, въ которомъ сдѣлано маленькое круглое отверстіе, (въ 2 или 3 мм. діаметромъ). Это отверстіе должно приходиться по возможности на оси объектива. Потомъ затемняютъ комнату и весьма недалеко отъ означеннаго отверстія внѣ камеры помещаютъ пламя свѣчи, а объективъ прикрываютъ промасленною бумагою, на которой получится свѣтлый кружокъ, образуемый пучкомъ параллельныхъ лучей, выходящихъ изъ объектива. Діаметръ этого кружка и представитъ діаметръ дѣйствующаго отверстія объектива. Конечно, величина этого кружка зависитъ отъ величины отверстія диафрагмы, вставленной въ объективъ. Чтобы очертанія кружка получались на промасленной бумагѣ рѣзче, пламя свѣчи замѣняютъ горящимъ магніемъ. Наконецъ, можно бумагу замѣнить чувствительною пластинкою, прикрѣпивъ ее къ объективу надлежащимъ образомъ въ темнотѣ

и окутывъ чернымъ сукномъ. Послѣ достаточной экспозиціи проявляютъ пластинку и получаютъ на ней замѣтный кругъ.

Величину дѣйствующаго отверстия можно опредѣлять и черченіемъ. Это будетъ понятно изъ того, что будетъ говориться въ § 65.

Дѣйствующее отверстіе есть ничто иное, какъ такъ называемый *входный зрачокъ* § 65.

§ 61. С. **Опредѣленіе угла, обнимаемаго фотографическимъ объективомъ.** Наводятъ фотографич. аппаратъ съ испытуемымъ объективомъ на весьма отдаленные предметы и замѣчаютъ на матовомъ стеклѣ камеры діаметръ $A'B' = D$ (фиг. 110) наибольшаго круга, внутри котораго получается рѣзкое изображеніе. Изъ прямоугольнаго треугольника $A'OC$ имѣемъ;



фиг. 110.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{A'C}{OC} = \frac{A'B'}{2 \cdot OC}$$

Но OC можно считать равнымъ фокусному расстоянію объектива; слѣдоват.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{D}{2F'}$$

Вычисливъ по этой формулѣ уголъ α и удвоивъ его, мы получимъ искомый уголъ.

Впрочемъ, можно обойтись безъ вычисленія, начертивъ на бумагѣ уголъ $A'OB'$ по найденнымъ величинамъ OC и $A'B'$ и измеривъ его помощью транспортира.

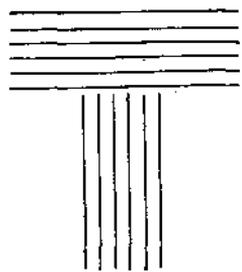
Испытаніе фотографическаго объектива.

§ 62. А. **Обнаруженіе химическаго фокуса.** Передъ объективомъ фотографическаго аппарата помѣщаютъ горизонтально, но наклонно къ оси объектива линейку, вдоль которой наклеены довольно густо буквы и затѣмъ, прикрывшись чернымъ сукномъ, аккуратно при помощи лупы наводятъ аппаратъ на какую нибудь среднюю букву и фотографируютъ линейку. Если послѣ проявленія окажется, что самое отчетливое изображеніе соответствуетъ не той буквѣ, на которую былъ наведенъ аппаратъ, а другой, то химическій фокусъ объектива не совпадаетъ съ оптическимъ. Конечно, предполагается, что аппаратъ устроенъ правильно и чувствительная пластинка во время экспозиціи является точно на томъ же мѣстѣ, гдѣ послѣ наводки находилось матовое стекло.

§ 63. В. Обнаруженіе присутствія астигматизма. На экранѣ, перпендикулярномъ къ оси объектива, чертятъ рядъ горизонтальныхъ и рядъ вертикальныхъ линій, какъ показано на чертѣжѣ (фиг. 111).

Оказывается, что въ случаѣ присутствія астигматизма отчетливыя изображенія той и другой системы упомянутыхъ линій не лежатъ въ одной плоскости.

Если сначала установленъ приборъ такъ, что на матовомъ стеклѣ вертикальныя линіи представляются отчетливо, то для полученія отчетливаго изображенія горизонтальныхъ линій обыкновенно приходится нѣсколько приблизить матовое стекло къ объективу.



фиг. 111.

§ 64. С. Обнаруженіе дисторціи (отсутствія подобія). На экранѣ, поставленномъ перпендикулярно къ оси объектива, чертятъ рядъ вертикальныхъ линій на столько длинныхъ, чтобы изображенія ихъ прострѣлились на матовомъ стеклѣ по всему рѣзкому полю. Если объективъ неортоскопиченъ, то средняя линія, расположенная по серединѣ матоваго стекла, представится въ видѣ прямой, тогда какъ линіи, расположенныя влѣво и вправо отъ нея, представятся изогнутыми. Система квадратовъ должна изображаться на матовомъ стеклѣ тоже въ видѣ системы (правильныхъ) квадратовъ.

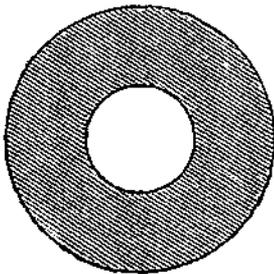
Примѣчаніе. Изъ сказаннаго въ этой главѣ по поводу устройства анастигматовъ не слѣдуетъ заключать, чтобы принципъ П. Рудольфа былъ необходимымъ условіемъ для устройства анастигмата. Строятъ анастигматы и безъ соблюденія этого условія.

При вычисленіи такихъ системъ, какъ анастигматъ, не ограничиваются одними меридіональными лучами. Формулы, по которымъ ведется вычисленіе лучей для анастигмата, можно найти въ томъ же сочиненіи Гляйхена, о которомъ упоминалось на стр. 150.

ГЛАВА III.

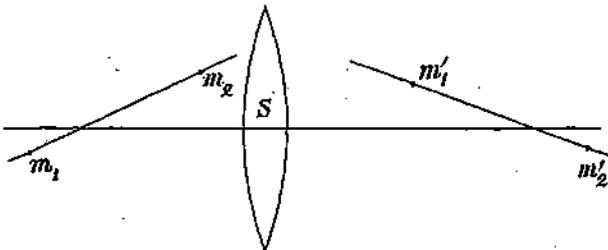
Общія замѣчанія объ оптическихъ инструментахъ.

§ 65. **Ограниченіе лучей.** Пучки свѣтовыхъ лучей, воспринимаемые оптической системою, ограничиваются или краями линзъ, изъ которыхъ состоитъ система, или диафрагмами. Диафрагма представляетъ собою пластинку обыкновенно съ круглымъ отверстіемъ (фиг. 112). Прежде, чѣмъ говорить объ ограниченіи лучей, укажемъ на слѣдующія предварительныя положенія, вытекающія изъ геометрической оптики, изложенной нами въ I главѣ сего сочиненія:



фиг. 112.

1. Двѣ точки m и m' , сопряженные по отношенію къ нѣкоторой системѣ, обладаютъ тѣмъ свойствомъ, что каждый лучъ, проходящій черезъ одну изъ нихъ и попадающій въ систему, по выходѣ изъ последней непременно проходитъ и черезъ другую. § 2 и § 3.

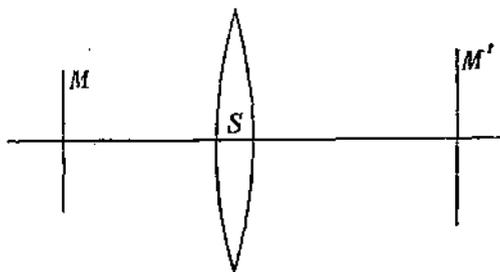


фиг. 113.

2. Если намъ дана пара точекъ m_1 и m_2 (фиг. 113) и другая пара точекъ m_1' и m_2' , соответственно сопряженныхъ съ первыми, то этимъ вполне опредѣляется положеніе двухъ сопряженныхъ лучей $m_1 m_2$ и $m_1' m_2'$.

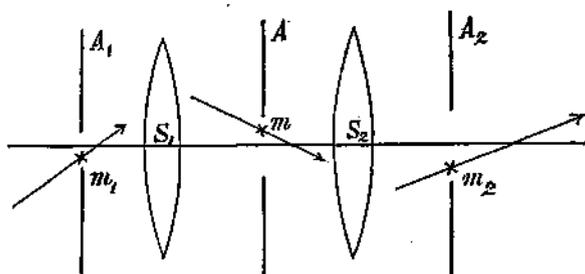
Это непосредственно вытекаетъ изъ перваго положенія.

3. Если одна плоскость M' (фиг. 114), перпендикулярная къ оптической оси системы S , служить изображеніемъ нѣкоторой другой плоскости M , то и эта послѣдняя служить изображеніемъ первой §§ 2 и 3.



фиг. 114.

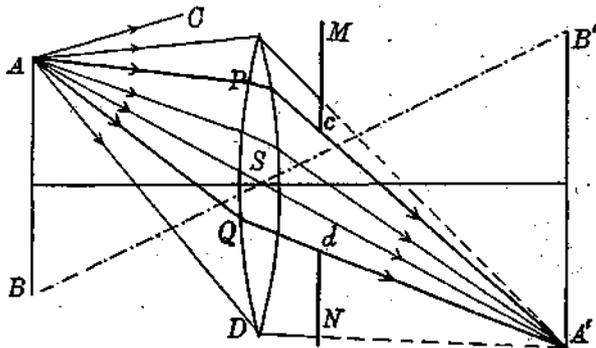
4. Если находящійся между двумя системами S_1 и S_2 (фиг. 115) предметъ A системою S_1 изобразится въ A_1 , а системою S_2 —въ A_2 , то A_1 общею системою S_1+S_2 очевидно изобразится въ A_2 (пунктъ 3).



фиг. 115.

5. Если двѣ діафрагмы A и A_2 (фиг. 115) по отношенію къ системѣ S_2 находятся въ такомъ соотношеніи, что одна служитъ изображеніемъ другой, то всякій такой лучъ, который при выходѣ изъ системы S_2 проходитъ черезъ нѣкоторую точку m_2 отверстія діафрагмы A_2 , долженъ былъ при входеніи въ систему S_2 пройти черезъ точку m отверстія діафрагмы A , сопряженную съ m_2 . Это потому, что если діафрагмы A и A_2 другъ другу служатъ изображеніями, то плоскости ихъ состоятъ изъ соотвѣтственно сопряженныхъ точекъ. При этомъ эти сопряженные точки располагаются, конечно, не только въ тѣлесныхъ частяхъ діафрагмъ, но и въ отверстіяхъ ихъ.

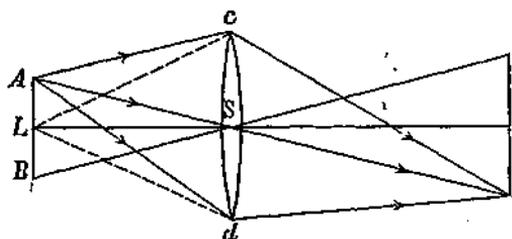
Сдѣлаемъ еще одно замѣчаніе. Пусть на чертежѣ (фиг. 116) S представляетъ нѣкоторую оптическую систему, которая даетъ изображеніе $A'B'$ предмета AB и пусть MN представляетъ діафрагму съ отверстіемъ cd . Понятно, что не всё



фиг. 116.

лучи, исходящие изъ точекъ предмета, могутъ принимать участіе въ образованіи (въ происхожденіи) изображенія. Такіе лучи и пучки лучей, которые дѣйствительно принимаютъ участіе въ образованіи изображенія, мы назовемъ *дѣйствующими*. Изъ числа всѣхъ лучей, которые выходятъ изъ A , только тѣ слѣдуетъ считать дѣйствующими, которые содержатся въ пучкѣ PAQ , такъ какъ только лучи этого пучка по выходѣ изъ системы S , пересѣкаясь, производятъ (образуютъ) точку A' , служащую изображеніемъ точки A . Что же касается такихъ лучей, какъ напр. AC и AD , то ихъ нельзя считать дѣйствующими, такъ какъ они, выйдя изъ точки A , не доходятъ до изображенія ея A' ; первый не доходитъ, потому что не попадаетъ въ систему S , а второй — потому что встрѣчаетъ преграду — непрозрачную часть діафрагмы MN .

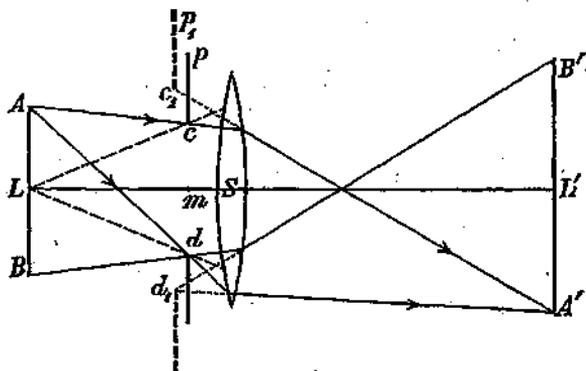
Теперь рассмотримъ ближе вопросъ объ ограниченіи лучей. Начнемъ съ самаго простаго случая (фиг. 117), когда система (линза)



фиг. 117.

сама своими краями ограничиваетъ пучки дѣйствующихъ лучей и дѣйствующими лучами здѣсь являются всѣ тѣ, которые, направляясь изъ точекъ предмета, достигаютъ поверхности системы S . Каждая точка предмета AB посылаетъ коническій пучекъ входящихъ лучей. Этому коническому пучку соответствуетъ сопряженный съ нимъ коническій пучекъ выходящихъ лучей; напр. входящему пучку cAd соответствуетъ сопряженный съ нимъ выходящій пучекъ $cA'd$. Поверхность системы S (или лучше поверхность круга cd) служитъ общимъ основаніемъ, какъ для всѣхъ входящихъ коническихъ пучковъ, такъ и для всѣхъ выходящихъ, сопряженныхъ съ первыми.

Пусть теперь при системѣ S (фиг. 118)

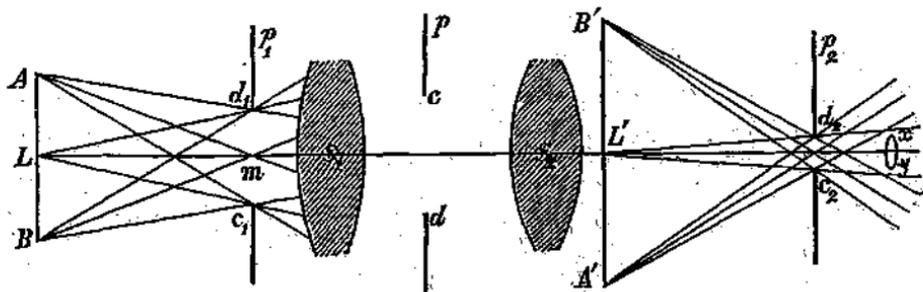


фиг. 118.

находится еще діафрагма p . Прежде всего строимъ изображеніе этой діафрагмы. Пусть этимъ изображеніемъ будетъ p_1 . Полезно

замѣтить, что если еще намъ будетъ дано изображеніе $A'B'$ даннаго предмета AB , то этимъ уже вполне опредѣляется ходъ каждаго луча. Дѣйствительно, напр. лучъ Ac , проходящій черезъ точки A и c , по выходѣ изъ системы S необходимо долженъ пройти черезъ сопряженныя для A и c точки, т. е. черезъ A' и c_1 . Также точно лучъ Bd по выходѣ изъ системы долженъ пройти черезъ B' и d_1 . Лучъ Ad долженъ пройти черезъ A' и d_1 (§ 65, пунктъ 1 или 2). Далѣе, на томъ же основаніи скажемъ, что если по выходѣ изъ системы лучъ направился по d_1B' , то до входа въ систему онъ долженъ былъ направляться по Bd , проходя черезъ точки d и B , сопряженныя съ d_1 и B' .

Очевидно, что для такого случая, какъ на чертежѣ (фиг. 118), дѣйствующимъ лучемъ будетъ только тотъ лучъ, который провѣкаетъ въ отверстіе cd тѣлесной диафрагмы p . Точка A посылаетъ коническій пучекъ лучей cAd , выполняющій отверстіе cd диафрагмы p , а такъ какъ отверстія cd и c_1d_1 состоятъ изъ соответственно сопряженныхъ точекъ, то пучку cAd отвѣчаетъ сопряженный съ нимъ коническій пучекъ $c_1A'd_1$, состоящій изъ лучей, выполняющихъ отверстіе c_1d_1 диафрагмы p_1 и соответственно сопряженныхъ съ лучами перваго пучка cAd . Сказанное о точкѣ A относится и къ остальнымъ точкамъ предмета AB . Значитъ, всѣ коническіе входящіе пучки, направляющіеся изъ различныхъ точекъ предмета AB , ограничиваются краями отверстія cd диафрагмы p , которое служитъ какъ бы общимъ основаніемъ для этихъ пучковъ. Что же касается выходящихъ коническихъ пучковъ, соответственно сопряженныхъ съ первыми (входящими пучками), то они ограничиваются краями отверстія c_1d_1 диафрагмы p_1 , которое въ свою очередь служитъ какъ бы общимъ основаніемъ для всѣхъ выходящихъ пучковъ.



фиг. 119.

Рассмотримъ теперь случай, когда тѣлесная диафрагма p (фиг. 119) находится между двумя системами S_1 и S_2 . Пусть p_1 представляемъ собою изображеніе диафрагмы p , даваемое системою S_1 , а p_2 — изо-

браженіе той же діафрагмы, даваемое системою S_2 . Пусть кромѣ того $A'B'$ представляетъ изображеніе предмета AB , даваемое всею системою $S_1 + S_2$. Очевидно, что дѣйствующимъ лучемъ будетъ только тотъ, который проникаетъ черезъ отверстіе тѣлесной діафрагмы p . Значитъ, каждая точка предмета AB доставитъ намъ пучекъ лучей, заполняющихъ вполне отверстіе cd діафрагмы p . Но такому пучку будетъ соответствовать съ одной стороны входящій коническій пучекъ (напр. $c_1 L d_1$), сопряженный съ первымъ по отношенію къ системѣ S_1 , а съ другой стороны — выходящій коническій пучекъ (напр. $c_2 L' d_2$), сопряженный съ первымъ же пучкомъ, но по отношенію къ системѣ S_2 . Всѣ входящіе коническіе пучки, направляющіеся изъ разныхъ точекъ предмета AB , ограничиваются краями отверстія $c_1 d_1$ діафрагмы p_1 и это отверстіе служитъ общимъ основаніемъ для всѣхъ входящихъ коническихъ пучковъ, тогда какъ выходящіе пучки, вершины которыхъ лежатъ въ точкахъ изображенія $A'B'$, ограничиваются краями отверстія $c_2 d_2$ діафрагмы p_2 и это отверстіе $c_2 d_2$ служитъ общимъ основаніемъ всѣхъ выходящихъ изъ системы $S_1 + S_2$ коническихъ пучковъ.

Значитъ, по отношенію къ системѣ $S_1 + S_2$ мѣра ограниченія лучей опредѣляется сопряженными отверстіями $c_1 d_1$ и $c_2 d_2$.

Отверстіе такой діафрагмы, которою ограничиваются входящіе пучки, по Аббэ называется *входнымъ зрачкомъ*, а отверстіе діафрагмы, ограничивающей выходящіе пучки, называется *выходнымъ зрачкомъ*.

На чертежѣ (фиг. 119) входнымъ зрачкомъ служитъ отверстіе $c_1 d_1$, выходнымъ — $c_2 d_2$. На чертежѣ (фиг. 118) входнымъ зрачкомъ служитъ отверстіе cd , а выходнымъ — $c_1 d_1$. Наконецъ, на чертежѣ (фиг. 117) входной и выходной зрачки совпадаютъ съ краями линзы.

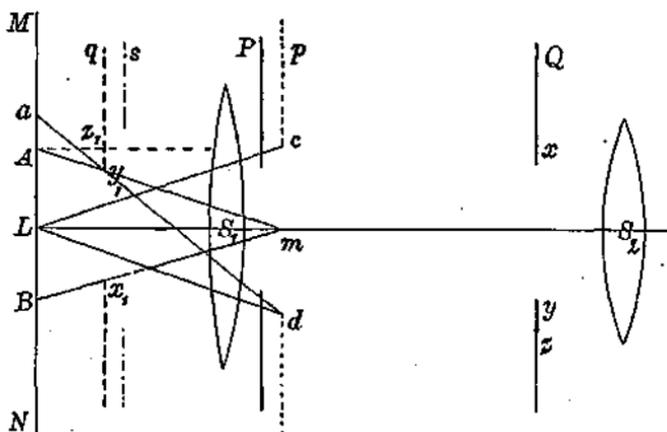
Вообще видимъ, что *входной зрачекъ оказывается сопряженнымъ съ выходнымъ зрачкомъ, такъ-что одинъ изъ нихъ можетъ быть принятъ за изображение другого*. Поэтому для заданной системы по данному одному изъ зрачковъ можно опредѣлить другой, какъ вычлененіемъ, такъ и построеніемъ.

Понятно, что подъ обоими зрачками понимаются отверстія не только тѣлесныхъ діафрагмъ, но и изображеній ихъ.

Если имѣется на лицо много такихъ діафрагмъ, какъ p (фиг. 119) и намъ нужно опредѣлить мѣру ограниченія напр. для входящихъ лучей, то надо прежде всего найти всѣ изображенія, какія можетъ доставить въ пространствѣ предмета (§ 10) система S_1 отъ заданныхъ діафрагмъ (включая сюда и края самихъ линзъ). Среди этихъ изображеній всегда найдется такое, котораго отверстіе изъ предметной

точки L кажется подь наименьшимъ угломъ. Это отверстие и принимается за входной зрачекъ.

Разсмотримъ ближе этотъ болѣе сложный случай. Пусть между двумя системами S_1 и S_2 (фиг. 120), представляющими въ совокупности систему $S_1 + S_2$, находятся двѣ телѣсныя діафрагмы P и Q . Согласно сказанному надо найти изображенія всѣхъ діафрагмъ (включая и края линзъ), какія можетъ дать система S_1 въ предметномъ пространствѣ. Края линзы S_1 служатъ сами себѣ изображеніемъ. Далѣе, пусть система S_1 даетъ отъ діафрагмы P мнимое изображеніе p ,



фиг. 120.

отъ діафрагмы Q — дѣйствительное изображеніе q и отъ краевъ линзы S_2 — дѣйствительное изображеніе z . Всѣ эти изображенія можно построить безъ труда, хотя-бы по способу, указанному въ § 28. Изъ осевой точки L предмета MN отверстие cd изображенія p видно подь наименьшимъ угломъ. Поэтому это отверстие cd и принимается за входной зрачекъ. Но въ разсматриваемомъ случаѣ (фиг. 120) не всѣ свѣтовые пучки, исходящіе изъ точекъ предмета и направляющіеся въ входной зрачекъ cd , заполняютъ его дѣйствующими лучами. Въ то время, какъ свѣтовой пучекъ, направляющійся, напр. изъ точки L , заполняетъ входной зрачекъ cd одними лишь дѣйствующими лучами, пучекъ, идущій изъ точки A , въ числѣ лучей, заполняющихъ зрачекъ cd , доставляетъ почти половину не дѣйствующихъ лучей, такъ какъ, напр. лучъ Az_1 , хотя и войдетъ въ систему S_1 , но по выходѣ изъ нея устремляясь въ точку z , сопряженную (по отношенію къ системѣ S_1) съ точкою z_1 , будетъ задержанъ въ z непрозрачною частью матеріальной діафрагмы Q , и только лучи, идущіе изъ A въ m , будутъ дѣйствующими. Чѣмъ далѣе отъ L отстоитъ точка предмета, тѣмъ меньше она посылаетъ въ зрачекъ cd дѣйствующихъ лу-

чей. Наконецъ точка a не посылаетъ ни одного дѣйствующаго луча. Точка a получается, если мы черезъ крайнія точки y_1 и d отверстій $y_1 x_1$ и cd проведемъ прямую до пересѣченія съ плоскостью предмета. Значитъ, не всѣ точки изображенія будутъ одинаково яркими и изображение по краямъ будетъ казаться какъ бы смытымъ, невыразительнымъ.

Очевидно, этотъ недостатокъ устраняется въ томъ случаѣ, когда изображение q совпадаетъ съ плоскостью предмета MN ; а это наступитъ, когда телѣсная діафрагма Q будетъ совпадать съ плоскостью изображения предмета AB , образуемаго (изображенія) системою S_2 . Тогда отверстіе діафрагмы q вырѣзаетъ въ плоскости предмета пѣкоторую часть, которая и будетъ изображаться равномерно ярко до краевъ, если только самъ предметъ будетъ равномерно освѣщенъ. Черезъ инструментъ будетъ видна только эта часть. Такъ обыкновенно и бываетъ въ нѣкоторыхъ оптическихъ инструментахъ: какъ въ микроскопахъ, такъ и въ телескопахъ въ плоскости изображенія помещается діафрагма, которая такимъ образомъ рѣзко ограничиваетъ поле зрѣнія, т. е. пространство, видимое черезъ оптический инструментъ; поэтому эта діафрагма называется *диафрагмою поля зрѣнія*, а уголъ, подъ которымъ изъ центра входного зрачка видно поле зрѣнія (видны двѣ крайнія и диаметрально противоположныя точки поля зрѣнія), называется *угломъ поля зрѣнія*. Объ этомъ углѣ мы еще будемъ говорить въ свое время.

Уголъ, подъ которымъ виденъ предметъ изъ центра входного зрачка, называется *предметнымъ угломъ*. Разница между предметнымъ угломъ и угломъ поля зрѣнія та, что предметный уголъ для системы переменная величина, зависящая отъ размѣровъ рассматриваемаго предмета, а уголъ поля зрѣнія для даннаго инструмента величина постоянная.

Уголъ, подъ которымъ виденъ (невооруженному глазу) изъ осевой точки предмета диаметръ входного зрачка, называется *угловымъ отверстіемъ* системы.

На черт. (фиг. 119) предметнымъ угломъ будетъ $\angle AmB$, а угловымъ отверстіемъ всей системы будетъ $\angle c_1 Ld_1$. На черт. (фиг. 117) предметный уголъ — $\angle ASB$, а угловое отверстіе — $\angle cLd$.

Мы предполагали, что отверстія діафрагмъ суть круги и центры этихъ круговъ лежатъ на оптической оси системы, что обыкновенно и имѣетъ мѣсто въ оптическихъ инструментахъ.

§ 66. Глазная точка, глазной кругъ (окулярный кругъ или окулярное кольцо Рамсдена). Изъ понятія о выходномъ зрачкѣ слѣдуетъ, что всѣ дѣйствующіе лучи, выходятъ изъ системы не иначе, какъ направляясь изъ выходного зрачка. Если система предназначена для

субъективнаго разсматриванія изображенія, т. е. для вооруженія глаза (луна, микроскопъ, телескопъ), такъ-что выходящiе изъ системы лучи должны попасть въ зрачекъ глаза наблюдателя, то надо имѣть въ виду, что для наблюдателя не безразлично, гдѣ помѣщенъ его глазъ во время наблюденія. Чтобы наибъгоднѣйшимъ образомъ утилизировать систему, вооружая ею глазъ, необходимо надо стараться по возможности помѣстить зрачекъ глаза въ томъ мѣстѣ, гдѣ находится выходной зрачекъ. Если допустить, что зрачекъ глаза по величинѣ и положенію совпадаетъ съ выходнымъ зрачкомъ, то, какъ легко видѣть на черт. (фиг. 119), всѣ выходящiе пучки отъ разныхъ точекъ изображенія, попадаютъ въ глазъ и мы видимъ все изображеніе на столько ярко, насколько позволяетъ система. Но совсѣмъ другое будетъ, если зрачекъ нашего глаза будетъ въ xy . Тогда, напр. точекъ A' и B' мы совсѣмъ не увидимъ, потому что пучки, идущіе изъ A' и B' черезъ выходной зрачекъ $s_2 d_2$, проходятъ мимо xy . Поэтому въ приборахъ для субъективн. разсматриванія предмета центръ выходнаго зрачка называется *глазною* или *окулярною точкою*, а самъ выходной зрачекъ называется *глазнымъ* или *окулярнымъ кругомъ*, а иногда *окулярнымъ кольцомъ Рамсдена*.

Понятно, что не всегда возможно глазной зрачекъ привести въ полное совпаденіе съ выходнымъ зрачкомъ уже по одному тому обстоятельству, что послѣдній можетъ оказаться гораздо больше или меньше перваго.

§ 67. **Нумерическая апертура.** Угловое отверстіе системы имѣетъ важное значеніе, такъ какъ оно вліяетъ на количество лучей, воспринимаемыхъ системою. Чѣмъ больше попадетъ въ систему лучей и дойдетъ до точекъ изображенія, тѣмъ ярче будетъ само изображеніе, а это далеко не безразлично при сужденіи о достоинствѣ оптической системы. Въ особенности важно угловое отверстіе въ микроскопахъ. Для сужденія о способности системы воспринимать лучи установлена вполнѣ рациональная величина, именно нумерическая апертура. Познакомимся ближе съ этою величиною. Положимъ, что для системы S (фиг. 121) имѣетъ мѣсто законъ синусовъ, тогда

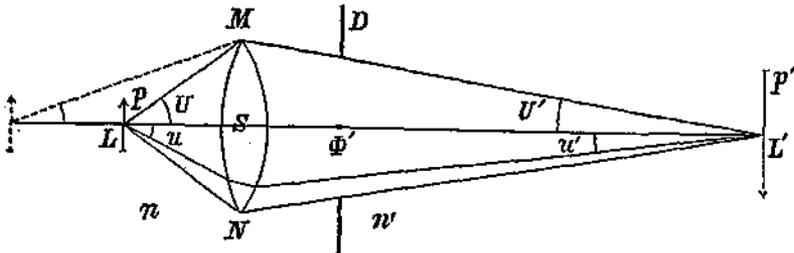
$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{n}{n'} \cdot \beta.$$

гдѣ u — уголъ наклоненія луча, выходящаго изъ предметной точки L ,
 u' — уголъ наклоненія луча, сопряженнаго съ первымъ,
 n — показатель преломленія той среды, къ которой принадлежитъ предметъ,

n' — показатель преломленія той среды, къ которой принадлежитъ изображеніе предмета

и β — линейное увеличеніе въ сопряженныхъ плоскостяхъ v и v'

Такъ какъ система предполагается апланатическою, то въ двухъ сопряженныхъ плоскостяхъ p и p' линейное увеличеніе β постоянно;



фиг. 121.

слѣдоват. $\frac{1}{\beta}$ пост. велнч., что для краткости обознач. такъ

$$\frac{1}{\beta} = \text{const.}$$

Поэтому

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \text{const.} \frac{n}{n'}$$

Предположимъ, что изображеніе L' происходитъ въ воздухѣ, а предметъ находится въ среднѣ, которой показателъ преломл. по отношенію къ воздуху есть n , тогда последнее равенство переписется такъ:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \text{const.} n$$

или

$$\sin u' = \text{const.} n \sin u \dots \dots \dots \text{(I)}$$

Допустимъ, что u' весьма мало (это на самомъ дѣлѣ имѣеть мѣсто для объективовъ микроскопа), тогда можемъ принять

$$\sin u' = u'$$

и равенство (I) переписется такъ:

$$u' = \text{const.} n \sin u \dots \dots \dots \text{(II)}$$

Обозначая половину углового отверстія входящаго коническаго пучка MLN черезъ U , а половину углового отверстія выходящаго коническаго пучка $ML'N$ черезъ U' , мы на основаніи формулы (II) получимъ:

$$U' = \text{const.} n \sin U \dots \dots \dots \text{(III)}$$

Эта формула показываетъ, что одному и тому же углу U' можетъ соответствовать и малый уголъ U , лишь бы зато n было достаточно большое.

Разсмотримъ ближе это обстоятельство и пояснимъ его на чертежѣ. Для этого скажемъ, что если бы показатель преломленія n возросъ, то для сохраненія того же значенія U' пришлось бы предметъ L передвинуть влѣво и опъ занять бы, напр. положеніе, которое мы изобразили на чертежѣ (фиг. 121) пунктиромъ. Чтобы это сдѣлать болѣе нагляднымъ, вообразимъ себѣ на время, что лучи идутъ обратно: отъ L' въ L . Тогда лучъ, идущій изъ L' въ M по прямой $L'M$, преломляясь при выходѣ изъ *стекла* S , отклонится къ оси тѣмъ слабѣе, чѣмъ выше показатель преломл. n той среды, которая влѣво отъ стекла S .

Значитъ, система можетъ воспринять опредѣленное количество лучей (соотвѣтственно опредѣленному значенію уг. U') и при узкомъ пучкѣ, входящемъ въ систему, лишь бы только n было достаточно велико.

Съ другой стороны, та же формула (III) показываетъ, что при одномъ и томъ же углѣ U уголъ U' будетъ (по абс. величинѣ) тѣмъ больше, чѣмъ n больше.

Поэтому количество лучей, доходящихъ до L' , возрастаетъ не только съ увеличеніемъ угла U , но и съ увеличеніемъ показ. прел. n . Такимъ образомъ выраженіе $n \sin U$ является истинною мѣрою способности системы воспринимать лучи. Оно называется по Аббѣ *численною апертурою* или просто *апертурою* и обозначается буквою a , такъ-что

$$a = n \sin U.$$

Если среда, въ которой лучи спускаетъ предметъ, есть воздухъ, то

$$n = 1$$

и

$$a = \sin U.$$

Тогда максимальное значеніе апертуры было бы 1 при $U = 90^\circ$, что отвѣчало бы входящему пучку съ угловымъ отверстіемъ въ 180° .

Если предметъ лучи спускаетъ въ средѣ, которой показ. преломленія

$$n = 1,5,$$

то максимальное значеніе апертуры равнялось бы 1,5, что тоже отвѣчало бы входящему пучку съ угловымъ отверстіемъ въ 180° .

Въ случаѣ, если предметъ лучи спускаетъ въ среднѣ съ показат. прел. $n = 1,5$, угловое отверстіе въ 120° даетъ для точки изображенія больше лучей, чѣмъ угловое отверстіе въ 180° въ случаѣ, когда предметъ лучи спускаетъ въ воздухъ; потому что въ первомъ случаѣ $a = 1,5 \cdot \sin 60^\circ = 1,3$, а въ послѣднемъ — $a = 1 \cdot \sin 90^\circ = 1$.

Угловое отверстие въ 120° еще осуществимо на практикѣ, тогда какъ угловое отверстие въ 180° неосуществимо.

Выведемъ формулу, которая даетъ возможность легко опредѣлить апертуру эмпирически. Пусть на чертежѣ (фиг. 121) точки L и L' по прежнему представляютъ апланатическія точки по отношенію къ системѣ S . Обозначимъ второе фокусное расстояние системы S черезъ F' , а второй фокусъ черезъ Φ' . Далѣе, вообразимъ себѣ въ фокусной плоскости Φ' діафрагму D , ограничивающую краями своего отверстия выходящій пучекъ лучей $ML'N$. Обозначимъ радиусъ отверстия этой діафр. черезъ R' , а расстояние $L'\Phi'$ изображенія L' отъ фокуса Φ' —черезъ x' . Тогда изъ прямоуг. треугольничка $DL'\Phi'$ получаемъ:

$$D\Phi' = \Phi'L' \operatorname{tg} DL'\Phi'$$

или

$$R' = -x' \operatorname{tg} U'.$$

Знакъ (—) поставленъ, потому что при выводѣ формулъ мы не желаемъ отступать отъ сдѣланныхъ раньше положеній относительно угла наклоненія § 4. Въ нашемъ случаѣ (фиг. 121) U' считается отрицательнымъ (§ 4). Что же касается радиуса R' , то онъ представляетъ положительную величину. Въ виду этихъ соображеній поставленъ въ послѣднемъ равенствѣ знакъ (—). Такъ какъ предполагается, что уголь U' по абс. величинѣ очень малъ, то можно принять $\operatorname{tg} U' = U'$ и предыдущее равенство переписнется такъ:

$$R' = -x'U' \dots \dots \dots (IV)$$

Переписшемъ ур. (III) въ такомъ видѣ

$$U' = \frac{1}{\beta} n \sin U$$

и вспомнимъ, что

$$\beta = \frac{x'}{F'} \quad \S 20.$$

Тогда на основаніи двухъ послѣднихъ равенствъ уравненіе (IV) переписнется такъ:

$$R' = -F' \cdot n \sin U,$$

откуда находимъ, что

$$\frac{R'}{-F'} = n \sin U = a$$

или

$$a = \frac{R'}{-F'}$$

или

$$a = \frac{R'}{f'} \dots \dots \dots (93)$$

гдѣ f' = абс. вел. F' .

Значитъ, чтобы опредѣлить нумерическую апертуру системы, для которой широкому входящему пучку отвѣчаетъ весьма узкій выходящий пучекъ, надо радиусъ поперечнаго сѣченія пучка въ плоскости второго фокуса раздѣлить на абсолютную величину второго фокуснаго расстоянія.

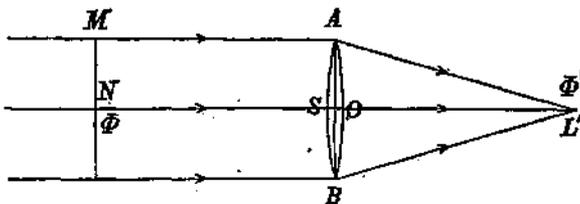
Объективы для телескопа и фотографическіе объективы въ отношеніи входящаго и выходящаго пучковъ представляютъ почти обратное по сравненію съ объективомъ микроскопа.

Такъ какъ для первыхъ объективовъ расстояние предмета предполагается очень большимъ въ сравненіи съ фокуснымъ расстояніемъ, то для нихъ входящій конусъ очень узокъ, а выходящій сравнительно широкій. Поэтому, чтобы вывести выраженіе для апертуры телескопическаго и фотографическаго объективовъ, достаточно въ выше изложенныхъ разсужденіяхъ по поводу апертуры микроскопа замѣнить пространство предмета пространствомъ изображенія и обратно. Тогда безъ труда можно получить такое выраженіе для апертуры означенныхъ объективовъ:

$$a' = \frac{R}{f} \dots \dots \dots (94)$$

гдѣ подъ f понимается первое фокусное расстояние объектива, а подъ R — радиусъ поперечнаго сѣченія пучка въ плоскости перваго фокуса.

Предположимъ, что на черт. (фиг. 122) S представляетъ телескопическій или фотографическій объективъ. Осевая точка L предмета



фиг. 122.

такъ далеко на оси, что лучи, идущіе отъ нея и входящіе въ входной зрачекъ AB , можно считать параллельными. Поэтому можно принять.

$$MN = AO.$$

Значитъ въ формулѣ (94) подъ R можно понимать радиусъ входнаго зрачка объектива.

Изъ равенства (94) слѣдуетъ, что

$$2 a' = \frac{2R}{f}$$

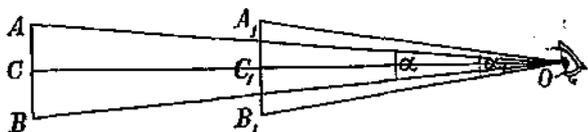
или

$$2 a' = \frac{D}{f},$$

гдѣ подъ D понимается діаметръ входного зрачка. Выраженіе $\frac{D}{f}$

называется *относительнымъ отверстиемъ* объектива, и по отношенію къ телескопическому, а равно и по отношенію къ фотографическому объективамъ оно служитъ мѣрою способности ихъ воспринимать свѣтовые лучи, о чемъ впрочемъ уже упоминалось.

§ 68. **Видимый діаметръ и увеличеніе.** *Видимымъ діаметромъ* предмета (или изображенія) называется уголъ, подъ которымъ мы его видимъ. Такимъ образомъ видимый діаметръ (или иначе еще *видимая величина*) предмета AB (фиг. 123) есть уголъ AOB , образуемый



фиг. 123.

прямыми, идущими изъ центра глазного зрачка O къ крайнимъ точкамъ A и B предмета AB . Предметный уголъ, о которомъ мы говорили въ § 65, представляетъ частный случай видимого діаметра (когда центръ глазного зрачка совпадаетъ съ центромъ входного зрачка). Полагая, что C середина отръзка AB и прямая OC перпендикулярна къ AB , мы изъ треуг. AOC получаемъ:

$$\frac{AB}{2} = AC = CO \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{AB}{2 \cdot CO}.$$

Если уголъ α очень малъ, то можно принять

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$$

и въ такомъ случаѣ получимъ:

$$\frac{\alpha}{2} = \frac{AB}{2 \cdot CO}$$

или

$$\alpha = \frac{AB}{CO} \dots \dots \dots (1)$$

гдѣ подѣ α понимается видимый діаметръ предмета AB съ расстоянія OC .

Для другого предмета A_1B_1 , находящагося на расстояніи OC_1 отъ глаза, найдемъ:

$$\alpha_1 = \frac{A_1B_1}{OC_1} \dots \dots \dots (II)$$

Изъ (I) и (II) получимъ, что

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{AB}{A_1B_1} \cdot \frac{OC_1}{OC} \dots \dots \dots (III)$$

Если $AB = A_1B_1$, то равенство (III) дастъ пропорцію:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{OC_1}{OC} \dots \dots \dots (IV)$$

а если $OC_1 = OC$, то то-же равенство (III) дастъ такую пропорцію:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{AB}{A_1B_1} \dots \dots \dots (V)$$

Значитъ, въ случаѣ, если предметъ виденъ подѣ очень малымъ угломъ, мы на основаніи равенствъ (IV) и (V) можемъ высказать такія положенія:

1. Видимый діаметръ одного и того же предмета обратно пропорціоналенъ расстоянію послѣдняго отъ глаза наблюдателя.
2. Отношеніе видимыхъ діаметровъ двухъ различныхъ предметовъ, разсматриваемыхъ съ одного и того же расстоянія, равно отношенію ихъ линейныхъ величинъ.

Что касается увеличенія, то, смотря по роду системы, различаютъ объективное и субъективное увеличенія.

Подѣ увеличеніемъ такой системы, которая даетъ объективное изображеніе (фотографическіе объективы), понимается собственно линейное увеличеніе, т. е. частное отъ дѣленія линейной величины изображенія на линейную величину предмета и такое увеличеніе называется *объективнымъ*. Оно вычисляется по формулѣ (40). Въ системѣ же, предназначенной для разсматриванія черезъ нее предметовъ глазомъ (лупа, микроскопъ, телескопъ), берется во вниманіе *субъективное* увеличеніе.

Увеличеніе микроскопа есть отношеніе линейной величины изображенія, наблюдаемаго въ микроскопъ на расстояніи наилучшаго видѣнія (зрѣнія), къ линейной величинѣ самого предмета.

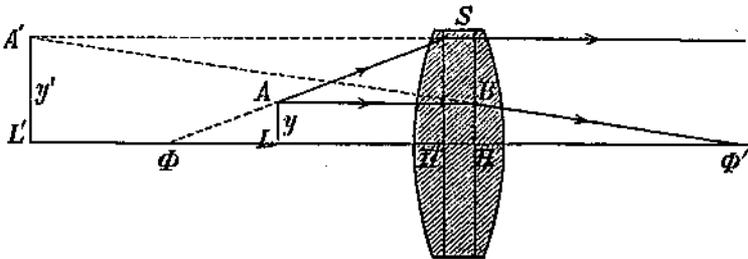
Такъ какъ разстояніе наилучшаго видѣнія вообще для разныхъ лицъ различно, то увеличеніе микроскопа чисто субъективное явленіе: одинъ и тотъ же микроскопъ можетъ для различныхъ лицъ дать разные увеличенія. Желая установить нѣкоторую опредѣленность при

сравнительной оптикъ увеличенія микроскоповъ, приняли за разстоянiе наилучшаго видѣнiя менѣе-болѣе среднее число

$$d = 250 \text{ mm.}$$

Часто увеличенiе микроскопа опредѣляется, какъ отношенiе видимаго диаметра изображенiя къ видимому диаметру предмета въ предположенiи, что предметъ и изображенiе помѣщаются на одинаковомъ разстоянiи отъ глаза и именно на разстоянiи наилучшаго видѣнiя $d = 250 \text{ mm.}$ Такое опредѣленiе согласно съ нашимъ въ томъ случаѣ, если упомянутые угловые диаметры весьма малы, такъ какъ тогда на основанiи того, что сказано въ этомъ параграфѣ (пунктъ 2), отношенiе видимыхъ диаметровъ изображенiя и предмета можно замѣнить отношенiемъ линейныхъ величинъ послѣднихъ.

Найдемъ выраженiе для увеличенiя простаго микроскопа, т. е. линзы S (фиг. 124), которой первое фокусное разстоянiе пусть будетъ



фиг. 124.

F , а второе F' . Положимъ, что предметъ AL установленъ такъ, что изображенiе его $A'L'$ находится на разстоянiи наилучшаго видѣнiя отъ глаза, помѣщеннаго (приблизительно) во второмъ фокусѣ F' линзы S . Тогда искомое увеличенiе

$$N = \text{абс. в. } \frac{y'}{y},$$

гдѣ y и y' (по абс. величинѣ) соотвѣтственно выражаютъ линейныя величины предмета и изображенiя. Изъ подобныхъ треугольниковъ $A'F'L'$ и $BF'H'$ имѣемъ:

$$\frac{A'L'}{BH'} = \frac{L'F'}{H'F'}$$

Но $A'L' = y'$, $BH' = AL = y$, $L'F' = d = \text{разстоянiю наил. видѣнiя}$ и $H'F' = -F'$;

слѣдовательно наша пропорцiя переписывается такъ:

$$\frac{y'}{y} = \frac{d}{-F'}$$

поэтому

$$N = \frac{d}{-F'}$$

или

$$N = \frac{d}{f'} \dots \dots \dots (95)$$

гдѣ

$$f' = \text{абс. вел. } F'.$$

Но предпоследнее выражение сразу выводится изъ формулы для линейнаго увеличенія (40) — § 18:

$$\frac{y'}{y} = \frac{x'}{F'}$$

Примѣняя эту формулу къ нашему случаю и замѣчая, что

$$x' = -d \text{ и } F' = -f',$$

легко получимъ формулу (95), выведенную на основаніи свойствъ чертежа (фиг. 124).

Здѣсь важно замѣтить, что мы могли бы подѣ *S* (фиг. 124) понимать, какую угодно систему съ кардинальными точками *H*, *H'*, *F* и *F'* и повторяя по отношенію къ ней рассужденія, изложенныя выше, мы убѣдились бы такимъ образомъ въ томъ, что и для всякой системы (а слѣдовательно и для сложнаго микроскопа) имѣетъ мѣсто формула:

$$N = \frac{d}{f'}$$

или

$$N = \frac{250}{f'} \dots \dots \dots (96)$$

гдѣ подѣ *f'* понимается абсолютная величина второго фокуснаго расстоянія вообще системы. Это *f'* въ формулѣ (96) должно считаться выраженнымъ въ *миллиметрахъ*.

Примѣняя формулу (40) къ сложному микроскопу, мы бы могли въ ней принять $x' = -d$ на томъ основаніи, что второй фокусъ *F'* сложнаго микроскопа можно считать лежащимъ тамъ же, гдѣ и зра-

Примѣчаніе. Первое фокусное расстояние *F'* собирающей системы положительное § 28. Поэтому на основаніи формулы $\frac{F'}{F} = -\frac{n'}{n}$ заключаемъ, что второе фокусное расстояние собирающей системы отрицательное. Въ формулахъ для практическихъ примѣненій будемъ стараться вводить абсолютныя величины вмѣсто количествъ.

чень глаза наблюдателя. Последнее можно проверить на опыте. Для этой цели слѣдуетъ помѣстить микроскопъ на значительномъ разстояніи отъ источника свѣта и направить плоское зеркало микроскопа такъ, чтобы пучки идущіе отъ этого источника попадали въ микроскопъ. Переминая надъ окуляромъ лоскутокъ тонкой промасленной бумаги (то приближая ее къ окуляру, то удаляя отъ него), легко найти изображеніе источника свѣта, т. е. мѣсто второго фокуса F' всего микроскопа, и это мѣсто, какъ окажется, будетъ надъ окуляромъ примѣрно въ томъ же мѣстѣ, гдѣ обыкновенно мы помѣщаемъ глазъ, когда смотримъ въ микроскопъ.

Замѣтимъ, что Аббэ иначе опредѣляетъ увеличеніе микроскопа. За увеличеніе микроскопа онъ принимаетъ отношеніе $\frac{iga}{y}$, гдѣ подъ y понимается линейная величина предмета, а подъ α —угловой діаметръ изображенія на разстояніи наилучшаго видѣнія. Увеличеніе по Аббэ обозначается обыкновенно буквою V , такъ-что $V = \frac{iga}{y}$.

Можно было бы доказать, что $N = dV$, но мы считаемъ это лишнимъ. Изъ послѣдней формулы вытекаетъ, что $V = \frac{1}{f}$.

V называется *абсолютнымъ увеличеніемъ* микроскопа.

Увеличеніе-телескопа есть отношеніе видимаго діаметра изображенія, наблюдаемаго въ трубу, къ видимому діаметру предмета. Въ статьѣ о телескопѣ увидимъ, что это увеличеніе есть ничто иное, какъ абсолют. величина углового увеличенія телескопа, которое мы привыкли обозначать буквою A . Такъ что, обозначая увеличеніе телескопа черезъ Y , получимъ: $Y = \text{абс. вел. } A$.

§ 69. Нѣкоторыя замѣчанія изъ теоріи волнообразнаго движенія эфира.

Если на поверхность спокойной стоящей воды станемъ періодически пускать въ одно и то же мѣсто одну за другою капли воды, то эти капли, падая въ воду, нарушаютъ спокойное состояніе ея частицъ и послѣднія стануть колебаться. Но эти колебанія не ограничатся однимъ мѣстомъ, а будутъ передаваться отъ частицы къ частицѣ во всѣ стороны все дальше и дальше. Отъ этого на поверхности воды образуются около мѣста, куда періодически падаютъ капли, нѣкоторыя кольцеобразныя волны, которыя какъ бы рождаются въ мѣстѣ, куда падаютъ капли и затѣмъ растутъ, расширяясь все дальше и дальше. Частицы на поверхности воды, какъ только стануть черезъ нихъ проходить означенныя кольца, начнутъ колебаться около своей точки равновѣсія то поднимаясь, то опускаясь. Въ этомъ явленіи то характерно, что всѣ частицы, лежащія на одинаковомъ разстояніи отъ

мѣста, куда падаютъ капли, т. е. лежащія на нѣкоторой окружности, въ каждый моментъ времени находятся въ одинаковомъ состоянн движенія: онѣ либо всѣ приподняты на одинаковую высоту, либо опущены одинаково глубоко, либо находятся въ первоначальномъ положенн равновѣсія. Подобное явленіе происходитъ и въ эфирѣ, наполняющемъ мировое пространство и служащемъ посредникомъ для передачи свѣта отъ одного мѣста къ другому.

Если точка A (фиг. 125) есть свѣтящаяся точка, то свѣтотыя колебанія, происходящія въ ней, передаются частицамъ эфира во всѣ

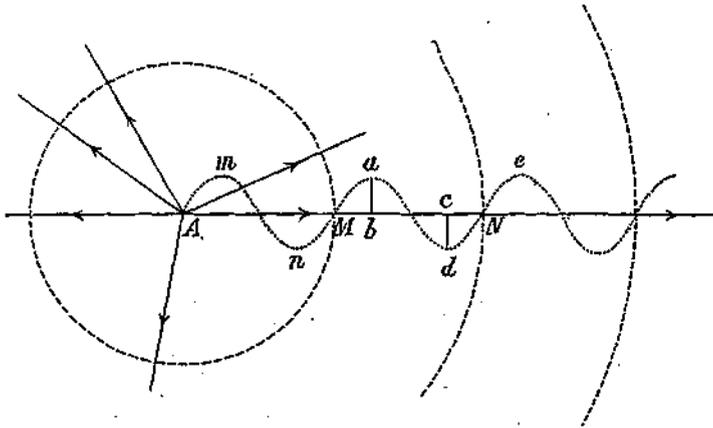


рис. 125.

стороны и около нея образуются сферическія поверхности, характерныя тѣмъ, что частицы эфира, расположенныя на этихъ поверхностяхъ, въ произвольный моментъ времени находятся въ одинаковомъ состоянн движенія, напр. въ данный моментъ находятся на максимальномъ разстоянн отъ первонач. положенія равновѣсія.

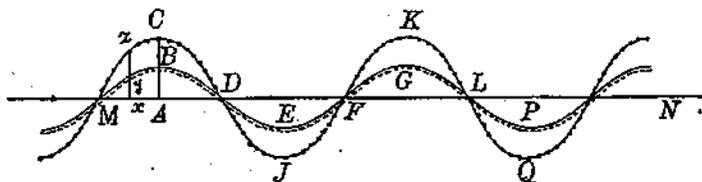
Такимъ образомъ колебанія эфира передаются изъ A дальше по цѣлымъ сферическимъ поверхностямъ, окружающимъ точку A , причемъ образуются вокругъ точки A сферическія свѣтотыя волны, которыя какъ бы рождаются въ A и затѣмъ, возрастая, идутъ все дальше и дальше, оставаясь концентрическими съ общимъ центромъ въ A . Частицы эфира, которыя прежде, когда не было источника свѣта A , располагались въ равновѣсн по нѣкоторой прямой AN , теперь въ присутствн источника свѣта A , коль скоро станутъ идти одна за другою упомянутыя сферическія волны, придутъ въ колебаніе, перпендикулярное къ прямой AN и въ нѣкоторый моментъ времени образуютъ своимъ расположеніемъ нѣкоторую линію $AmnMa dNe$. Что же касается до свѣтотыхъ волнъ: то одна изъ нихъ на нашемъ чертежѣ представилась бы, какъ содержащаяся между сферич. поверхностями,

проходящими через точки M и N . Конечно, MN на чертежѣ для ясности взято въ нѣсколько тысячъ разъ больше дѣйствительной величины.

Разстояніе между двумя ближайшими точками съ одинаковымъ состояніемъ движенія или, какъ говорятъ, съ одинаковою фазою, напр. разстояніе MN , называется *длиною* свѣтовой волны и обозначается обыкновенно буквою λ . Длина волны λ бываетъ различна въ зависимости отъ цвѣта и среды, въ которой распространяется свѣтъ. Но вообще λ весьма малая величина и меньше $\frac{1}{1000}$ мм. Наибольшее разстояніе колеблющейся частицы эфира отъ ея первоначальнаго положенія равновѣсія, т. е. напр. разстояніе ab , называется *амплитудою*, обуславливающею силу или интенсивность свѣта. Сила или интенсивность свѣта пропорціональна квадрату амплитуды.

Изъ точки A (фиг. 125) во всѣ стороны распространяются колебанія эфира, или, какъ говорятъ иначе, во всѣ стороны идетъ свѣтъ. Проводя изъ точки A рядъ прямыхъ, мы скажемъ, что по направленію каждой изъ этихъ линій распространяется свѣтъ. Линія, по которой распространяется свѣтъ отъ точки источника свѣта до данной точки, называется свѣтовымъ лучемъ. Значитъ, въ нашемъ случаѣ прямая AN представляетъ собою свѣтовой лучъ. Очевидно, что всѣ свѣтовые лучи, исходящіе изъ точ. A , перпендикулярны къ тѣмъ поверхностямъ, о которыхъ намъ упоминалось и которыя содержатъ на себѣ точки эфира съ одинаковымъ состояніемъ движенія.

Мы можемъ сказать, что если свѣтовой лучъ идетъ по линіи MN (фиг. 126), то это значитъ, что является нѣкоторая сила, которая заставляетъ частицы эфира, расположенныя по линіи MN , колебаться. Если бы по той же прямой шелъ въ то же время и другой свѣтовой лучъ, то тѣ же частицы эфира на прямой MN должны были



фиг. 126.

бы подчиниться и другой силѣ и подъ одновременнымъ вліяніемъ обѣихъ силъ колебались бы такъ, какъ онѣ колебались бы подъ вліяніемъ одной силы, представляющей равнодѣйствующую означенныхъ двухъ силъ, обуславливаемыхъ двумя лучами. Такое явленіе взаимодѣйствія двухъ или нѣсколькихъ лучей называется *интерференціей*, а лучи или соответствующія имъ волны, вызывающіе интерференцію, называются *интерферирующими*. Положимъ, что оба ин-

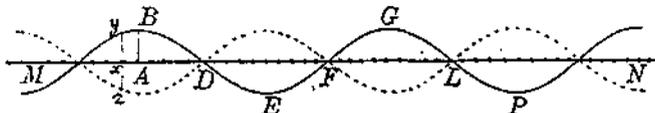
терферирующие лучи, идущие по MN , однофазные, т. е. любая частица эфира, покопшшаяся прежде на MN , подъ вліяніемъ каждаго луча стремится двигаться *въ томъ же смыслѣ* (въ каждый моментъ въ одинакую сторону). Понятно, что если нѣкоторая частица эфира x въ случаѣ одного лишь луча могла въ извѣстное время отодвинуться отъ прямой MN на xy , то подъ вліяніемъ силы, обусловливаемой двумя лучами, она въ то же время успѣетъ отодвинуться не на xy , а на разстояніе гораздо большее, напр. на xz , при чемъ $xz = 2xy$, если силы обонхъ лучей одинаковы.

Слѣдовательно для опредѣленія положенія частицъ эфира, подпавшихъ одновременно вліянію такихъ двухъ лучей, необходимо суммировать отклоненія отъ положенія равновѣсія, вызываемыя каждымъ отдѣльнымъ лучемъ. Такимъ образомъ частицы эфира подъ вліяніемъ двухъ упомянутыхъ лучей расположатся въ извѣстный моментъ времени по нѣкоторой линіи $MCDJKLQ$, тогда какъ въ случаѣ дѣйствія одного только луча тѣ же частицы въ тотъ же моментъ образовали бы своимъ расположеніемъ сплошную или пунктирную линію $MDEFGPLP$. Мы предполагаемъ, что сплошная линія соотвѣтствуетъ одному изъ интерферирующихъ лучей, а мелкопунктирная—другому.

Значить, результатомъ дѣйствія двухъ означенныхъ лучей является равнодѣйствующій лучъ, которому соотвѣтствуетъ линія $MCDJFKLQ$. Этому равнодѣйствующему лучу соотвѣтствуетъ также свѣтовая волна (какъ равнодѣйствующая двухъ интерферирующихъ волнъ) и важно тутъ то, что длина этой равнодѣйствующей волны такая же, какъ длина каждой интерферирующей волны, такъ какъ эта длина, какъ равнодѣйствующей, такъ и каждой изъ интерферирующихъ волнъ выражается тѣмъ же отрѣзкомъ MF (фиг. 126). Но амплитуда равнодѣйствующей волны (или луча), т. е. AC , равна суммѣ амплитудъ интерферирующихъ волнъ (или лучей). Слѣдовательно отъ взаимодѣйствія двухъ лучей въ нашемъ случаѣ свѣтъ усиливается. Такой случай, какъ на черт. (фиг. 126), могъ бы имѣть мѣсто въ предположеніи, что источники свѣта обонхъ лучей совпадаютъ или, находясь гдѣ то на продолженіи прямой MN , отстоятъ другъ отъ друга на разстояніи, равномъ нѣскольکو разъ взятой длинѣ волны, при чемъ оба луча одновременно выходятъ изъ своихъ источниковъ и съ одинаковою фазою. Тогда длины путей лучей, отсчитываемыя отъ источниковъ свѣта до любой точки на прямой MN , напр. до M , были бы или одинаковыми или отличались бы на разстояніе, равное нѣскольکو разъ взятой длинѣ волны.

Но бываетъ и такъ, что отъ взаимодѣйствія лучей свѣтъ ослабѣваетъ, а даже можетъ совсѣмъ исчезнуть. Пояснимъ это. Будемъ

называть *первым* лучемъ тотъ, который соотвѣтствуетъ сплошной линіи $MBDEFGLP$ и *вторымъ*,—которому соотвѣтствуетъ мелко-пунктирная линія, которая на чертежѣ (фиг. 126) изображена почти сливающейся съ сплошною. Вообразимъ себѣ, что пунктирная линія $MBDEFGLP$ (фиг. 126) сдвинулась вдоль линіи MN , напр. влѣво, на разстояніе, равное половинѣ длины волны, тогда-какъ сплошная линія осталась на мѣстѣ. Такое предположеніе можно считать равносильнымъ предположенію, что свѣтовой источникъ второго луча, сдвинулся влѣво вдоль прямой MN на половину длины волны и такимъ образомъ путь второго луча, отсчитываемый отъ источника его до нѣкоторой точки, навр. M , сталъ длиннѣе на половину длины волны; но при этомъ допускается, что оба луча: первый и второй, вышли изъ своихъ источниковъ одновременно и съ одинаковою фазою. Тогда мы будемъ имѣть случай, который представленъ на чертежѣ (фиг. 127). Теперь, если какая нибудь частица эфира x



фиг. 127.

(фиг. 127) подъ вліяніемъ перваго луча должна въ нѣкоторое время передвинуться на разстояніе xy вверхъ отъ своего положенія равновѣсія, то подъ вліяніемъ другого луча та же частица въ то же время должна передвинуться внизъ на разстояніе xz . Очевидно, если сила *) обоихъ лучей одинакова, то $xy = xz$ и частица эфира x , подчиняясь одновременно двумъ равнымъ, но прямо противоположнымъ по направленію силамъ, останется въ покоѣ. А такъ какъ свѣтъ есть колебаніе частицъ эфира, то въ данномъ случаѣ наступитъ полное уничтоженіе свѣта, ибо уничтожится это колебаніе. Если же $xy \neq xz$ и $xy > xz$, то частица x передвинется вверхъ на разстояніе равное $xy - xz$ и нетрудно сообразить, что въ этомъ послѣднемъ случаѣ ($xy > xz$) амплитуда равнодѣйствующаго луча равнялась бы разности амплитудъ интерферирующихъ лучей; слѣдовательно наступило бы ослабленіе свѣта.

Если бы мы разсмотрѣли всевозможные случаи, которые представились бы при допущеніи, что мелко-пунктирная линія, совпадавшая прежде съ сплошною, непрерывно движется, напр. влѣво, вдоль прямой MN , занимая всевозможныя положенія, начиная съ положенія, какъ на

*) Правильнѣе было бы слово „сила“ замѣнить въ данномъ случаѣ словомъ „амплитуда“, но мы сознательно допускаемъ нѣкоторую неточность въ выраженіяхъ ради большей наглядности разсужденій.

чер. (фиг. 126) и кончая положеніемъ, какъ на черт. (фиг. 127), то мы бы видѣли, что по отношенію къ свѣтовымъ дѣйствіямъ всѣ эти случаи представляютъ непрерывный переходъ отъ максимальнаго свѣтового дѣйствія (фиг. 126) къ минимальному свѣтов. дѣйствію (фиг. 127).

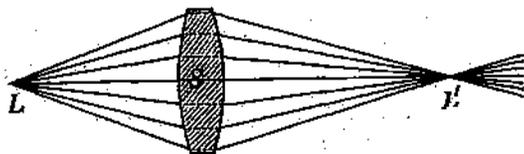
Если бы мы производили изслѣдованія дальше, то вообще убѣдились бы, что наибольшее (максимальное) дѣйствіе свѣта происходитъ въ томъ случаѣ, когда разность путей двухъ лучей, которую обозначимъ буквою r , равна нулю или четному числу полуволнъ, т. е. когда $r = 2n \frac{\lambda}{2}$. Напротивъ того, получается наименьшее (минимальное) свѣтовое дѣйствіе, когда разность путей двухъ лучей равна нечетному числу полуволнъ, т. е. когда $r = (2n + 1) \frac{\lambda}{2}$, понимая подъ словомъ „полуволна“ длину половины волны.

Въ физикѣ признается, что интерферируютъ между собою только тѣ лучи, которые исходятъ изъ одной и той же точки источника свѣта.

Лучи, выходящіе изъ какой нибудь самосвѣтящейся точки, расходятся въ разныя стороны, но есть возможность, применяя или отраженіе, или преломленіе, или диффракцію, измѣнить направленіе лучей и можетъ случиться, что лучи, вышедшіе изъ яѣкоторой свѣтящейся точки A , какъ первоначальнаго своего источника, потомъ опять сойдутся въ одной точкѣ, которую назовемъ буквою B . Понятно, что частица эфира въ точкѣ B подвергнется дѣйствію этихъ лучей и сообразно съ разностью путей попарно интерферирующихъ лучей произойдетъ то или другое свѣтовое дѣйствіе.

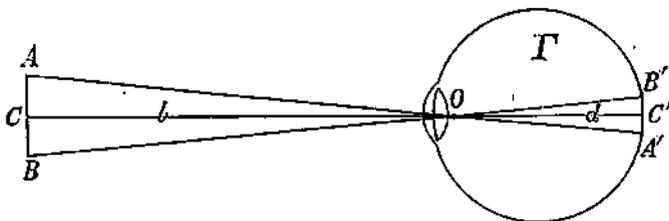
Этихъ краткихъ замѣчаній изъ теоріи волнообразнаго движенія эфира, считаемъ достаточнымъ, чтобы имѣть возможность въ послѣдствіи говорить о такъ называемомъ *вторичномъ изображеніи*, происходящемъ въ микроскопѣ. Но отчасти эти замѣчанія понадобятся намъ сейчасъ — въ слѣдующемъ параграфѣ.

Тутъ остается еще замѣтить, что если система S (фиг. 128) такова, что всѣ лучи, выходящіе изъ самосвѣтящейся точки L , по выходѣ изъ системы собираются (пересекаются) опять въ одной точкѣ L' , то, какъ доказывается въ физикѣ, всѣ эти лучи доходятъ до точки L' съ одинаковою фазою: слѣдовательно они содѣйствуютъ другъ другу, усиливая свѣтовое дѣйствіе въ точкѣ L' .



фиг. 128.

§ 70. Яркость предмета и изображения и связь между яркостью и увеличением. **Нормальное увеличение.** Положимъ, что некоторая свѣтящаяся поверхность AB (фиг. 129), находится на разстояніи $CO=l$ отъ глаза Γ , наблюдающаго яркость *) этой поверхности. Пусть $A'B'$ представляетъ изображеніе поверхности AB , расположеннаго на сѣтчатой оболочкѣ и пусть протяженіе $OC'=d$. До-



фиг. 129.

кажемъ, что яркость свѣтящейся поверхности не зависитъ отъ разстоянія послѣдней до глаза, т. е. не зависитъ отъ l . Прежде всего покажемъ, что величина поверхности изображенія $A'B'$ измѣняется обратно пропорціоально квадрату разстоянія поверхности AB отъ глаза наблюдателя. Считая AB и $A'B'$ перпендикулярными къ CC' , мы изъ подобныхъ треугольниковъ AOB и $A'O'B'$ находимъ, что

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OC'}{OC}$$

или

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{d}{l},$$

откуда

$$A'B' = \frac{d}{l} \cdot AB.$$

т. е. линейная величина изображенія измѣняется обратно пропорціоально разстоянію; слѣдовательно поверхность изображенія $A'B'$ измѣняется обратно пропорціоально *квадрату* того же разстоянія. Съ другой стороны намъ извѣстно изъ физики, что количество свѣта, падающее отъ свѣтящагося предмета на данную поверхность, обратно пропорціоально квадрату разстоянія поверхности отъ свѣтящагося предмета; слѣдовательно и количество свѣта, падающее отъ свѣтящейся поверхности AB на нашъ зрачекъ **) и проникающее въ глазъ,

*) Подъ яркостью понимаемъ силу (степень) возбужденія сѣтчатой оболочки глаза наблюдателя, предполагая, что эта сила (степень) пропорціоальна количеству свѣта, воспринимаемаго элементомъ сѣтчатой оболочки.

**) Подъ словомъ „зрачекъ“ въ данномъ случаѣ понимается входной зрачекъ. Входной и выходной зрачки почти совпадаютъ съ самимъ зрачкомъ глаза.

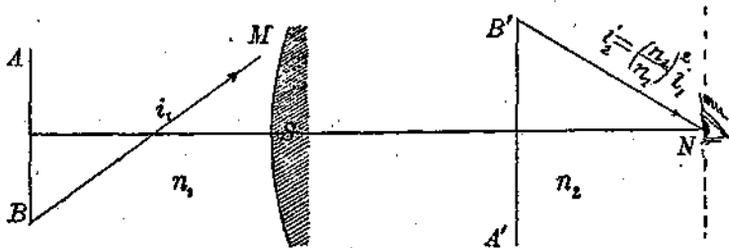
обратно пропорціонально квадрату разстоянія l , такъ какъ отверстие зрѣчка представляетъ тоже нѣкоторую поверхность. Предположимъ, что разстояніе $OC=l$ измѣнилось, напр. увеличилось въ m разъ; тогда хотя черезъ зрѣчекъ и будетъ проникать во внутрь глаза въ m^2 разъ меньше свѣта, но зато этотъ свѣтъ будетъ распредѣляться на поверхности въ m^2 разъ меньшей, потому что съ увеличеніемъ разстоянія $OC=l$ въ m разъ поверхность изображенія $A'B'$ становится въ m^2 разъ меньше; слѣдовательно количество свѣта, приходящееся на каждую единицу поверхности изображенія, съ измѣненіемъ разстоянія не измѣнится и каждый элементъ сѣтчатой оболочки, восприимчивый свѣтъ, будетъ одинаково возбужденъ, будетъ ли разстояніе OC равнымъ l или ml . Поэтому съ измѣненіемъ разстоянія яркость свѣтящейся поверхности покажется наблюдателю неизмѣнною.

Конечно, полученный выводъ условный. Онъ между прочимъ выведенъ въ предположеніи, что свѣтъ идетъ лишь на преломленіе безъ потери на отраженіе и поглощеніе, и что этотъ свѣтъ равномерно распредѣляется на поверхности, занятой изображеніемъ.

Если допустимъ, что свѣтовой лучъ, обладающій интенсивностью (силою) i_1 , которая, какъ мы видѣли, зависитъ отъ амплитуды его, вышелъ изъ среды съ показателемъ преломленія n_1 и претерпѣвъ нѣсколько преломленій, вошелъ въ среду съ показателемъ преломленія n_2 и интенсивность его въ послѣдней средѣ оказалась i_2 , то по закону Клаузіуса будетъ имѣть мѣсто равенство:

$$i_1 n_2^2 = i_2 n_1^2$$

При этомъ предполагается, что весь свѣтъ, падающій на преломляющую поверхность, идетъ только на преломленіе безъ потери его на отраженіе или поглощеніе. Значитъ, если система S (фиг. 130) даетъ изображеніе $A'B'$ свѣтящагося предмета AB и изъ нѣкоторой



фиг. 130.

точки B предмета AB падаетъ въ систему лучъ BM , обладающій интенсивностью i_1 , то сопряженный съ нимъ лучъ $B'N$, вышедшій изъ системы, будетъ обладать интенсивностью $i_2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot i_1$

Допуская $n_1 = n_2$, мы скажемъ, что въ послѣднемъ случаѣ, каждая точка изображенія лученспускаетъ съ такою силою, съ какою лученспускаетъ сопряженная съ нею точка предмета. Но и въ этомъ послѣднемъ случаѣ ($n_1 = n_2$) между лученспусканіемъ предмета и лученспусканіемъ изображенія та существенная разница, что свѣтящаяся точка предмета лученспускаетъ во все стороны, чего нельзя сказать о точкахъ изображенія. Напр. очевидно, что изъ точекъ изображенія $A'B'$ (фиг. 130) влево не пойдетъ ни одинъ лучъ, такъ какъ предполагается, что свѣтъ на нашемъ чертежѣ направляется черезъ систему S слѣва направо.

Въ оптическихъ приборахъ обыкновенно предметъ и изображеніе находятся въ воздухѣ; слѣдов. $n_1 = n_2$. Только у микроскоповъ при иммерсіонныхъ системахъ $n_1 > n_2$. Поэтому точки изображеній, наблюдаемыхъ въ оптическихъ приборахъ даже при самыхъ выгодныхъ условіяхъ могутъ свѣтить только съ силою, равною той, съ какою свѣтятъ сопряженные съ ними точки предмета, а при иммерсіонныхъ системахъ онѣ свѣтятъ обязательно съ меньшею силою, такъ какъ $n_1 > n_2$.

Беря во вниманіе то обстоятельство, что яркость свѣтящейся поверхности не зависитъ отъ разстоянія и что точки изображенія лученспускаютъ съ силою, вообще не превосходящею той, съ какою лученспускаютъ точки самого предмета, мы приходимъ къ заключенію, что яркость субъективныхъ изображеній, наблюдаемыхъ въ оптическомъ инструментѣ (микроскопѣ и телескопѣ) наивыше можетъ лишь равняться яркости непосредственно разсматриваемаго предмета и то въ томъ случаѣ, когда выходной зрачекъ оптического прибора не меньше зрачка глаза и находится съ нимъ въ одномъ и томъ же мѣстѣ, чтобы при наблюденіи изображенія черезъ оптический приборъ весь глазной зрачекъ наблюдателя могъ быть заполненнымъ лучами, исходящими въ видѣ коническихъ пучковъ изъ точекъ изображенія. Если же выходной зрачекъ оптического прибора меньше глазного зрачка, то при самыхъ выгодныхъ остальныхъ условіяхъ можно принять, что яркость изображенія относится къ яркости предмета, какъ поверхность выходного зрачка прибора (системы) относится къ поверхности глазного зрачка, т. е. тогда имѣетъ мѣсто формула:

$$\frac{H}{H_0} = \frac{r^2}{\rho^2},$$

гдѣ H —яркость изображенія, H_0 —яркость предмета, r —радіусъ выходного зрачка и ρ —радіусъ глазного зрачка.

Изъ этой формулы получаемъ:

$$H = H_0 \frac{r^2}{\rho^2} \dots \dots \dots (97)$$

Въ параграфѣ 67 мы вывели формулу

$$a = \frac{R'}{f'}$$

гдѣ f' абс. вел. втор. фок. разстоянія объектива, а R' радіусъ поперечнаго сѣченія выходящаго пучка второю фокусн. плоскостью объектива. Покажемъ, что такого же рода формула (приблизительно) имѣетъ мѣсто и по отношенію второй фокусной плоскости всего микроскопа. Пусть на чертежѣ (фиг. 131) AB представляетъ діаметръ входнаго, а $A'B'$ — діаметръ выходнаго зрачковъ микроскопа. Далѣе, пусть L представляетъ осевую точку предмета, а L' — сопряженную ей точку изображенія, наблюдаемаго черезъ микроскопъ. Предполагая, что точки L и L' апланатическія, мы напишемъ равенство:

$$\frac{\sin U}{\sin U'} = \frac{n'}{n} \beta,$$

откуда имѣемъ, что

$$n \sin U = n' \beta \sin U' \quad \dots \quad (98)$$

Но по § 18

$$\beta = \frac{x'}{F'} = \frac{x'}{-f'}$$

гдѣ f' абсол. величина втораго фокуснаго разстоянія F' всего микроскопа. Что же касается x' , то можно принять, что

$$x' = -C'L' = -d,$$

такъ какъ выходной зрачекъ $A'B'$ находится очень недалеко отъ втораго фокуса микроскопа.

Изъ $\Delta A'L'O'$ имѣемъ:

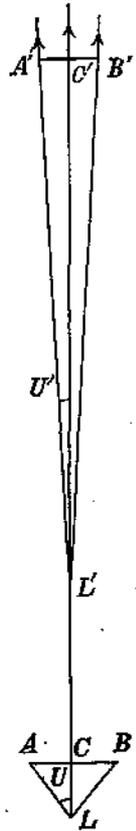
$$\operatorname{tg} U' = \frac{A'O'}{C'L'};$$

а такъ какъ уголъ U' очень малъ въ микроскопѣ, то можемъ принять, что

$$\operatorname{tg} U' = \sin U' = U' = \frac{A'O'}{C'L'} = \frac{r}{d}$$

Поэтому формула (98) представится такъ:

$$n \sin U = \frac{n' r}{f'}$$



фиг. 131.

откуда

$$a = \frac{n'r}{f'}$$

или

$$a = \frac{r}{f'} \dots \dots \dots (99)$$

такъ какъ для микроскопа $n' = 1$,

Въ § 68 мы видѣли, что

$$V = \frac{1}{f'} \text{ и } N = \frac{d}{f'};$$

поэтому

$$r = af' = a \frac{1}{V} = a \frac{d}{N}$$

и слѣдовател. для микроскопа ур. (97) можетъ быть переписано такъ:

$$H = H_0 \frac{a^2}{\rho^2} \cdot \frac{1}{V^2} = H_0 \frac{a^2}{\rho^2} \cdot \frac{d^2}{N^2} \dots \dots \dots (100)$$

Эта формула служить для опредѣленія яркости субъективнаго изображенія, наблюдаемаго въ микроскопѣ. Она показываетъ, что яркость изображенія въ микроскопѣ прямо пропорціональна квадрату апертуры и обратно пропорціональна квадрату увеличенія (линейнаго N или абсолютнаго V).

Мы видѣли въ § 25, что для телескопической системы имѣеть мѣсто равенство:

$$B = \frac{1}{A},$$

гдѣ B поперечное и A угловое увеличенія для какихъ нибудь двухъ сопряженныхъ плоскостей. Но такъ какъ выходной зрачекъ служить изображеніемъ входнаго зрачка, а входнымъ зрачкомъ для телескопа служить поверхность объектива его, то можемъ написать:

$$\frac{r}{R} = \text{абс. в. } \frac{y'}{y} = \text{абс. вел. } B,$$

гдѣ R радіусъ отверстія объектива, а r , попрежнему, радіусъ выходнаго зрачка.

Введя обозначеніе: $N = \text{абс. вел. } B$, получимъ,

$$\frac{r}{R} = N,$$

откуда

$$r = NR.$$

Очевидно также, что $N^2 = B^2 = \frac{1}{A^2} = \frac{1}{Y^2}$, гдѣ $Y = \text{абс. в. } A$ —§ 68.

Поэтому ур. (97) переписывается такъ:

$$H = H_0 \frac{R^2}{\rho^2} \cdot N^2$$

или

$$H = H_0 \frac{R^2}{\rho^2} \cdot \frac{1}{Y^2} \cdot \dots \dots \dots (101)$$

Последняя формула и служить для опредѣленія яркости субъективнаго изображенія, наблюдаемаго въ телескопѣ. Она показываетъ, что яркость изображенія, наблюдаемаго въ телескопѣ, прямо пропорціональна квадрату радиуса отверстія объектива и обратно пропорціональна квадрату увеличенія.

Формулы (100) и (101) не могутъ считаться строго точными уже по одному тому обстоятельству, что онѣ выведены въ предположеніи, что при прохожденіи изображенія весь свѣтъ идетъ на преломленіе безъ потери на отраженіе и поглощеніе.

Формула (100) показываетъ, что въ микроскопѣ яркость изображенія равна яркости предмета въ томъ случаѣ, если V и N принимаютъ частныя значенія V_0 и N_0 , опредѣляемые уравненіями:

$$V_0 = \frac{a}{\rho} \text{ или (что одно и то же) } N_0 = \frac{a}{\rho} d$$

Увеличеніе (V_0 и N_0), при которомъ яркость изображенія равна яркости предмета, называется *нормальнымъ*.

Принимая во вниманіе формулу (101), мы видимъ, что если $Y = \frac{R}{\rho}$, то $H = H_0$, т. е. въ телескопѣ яркость изображенія равна яркости предмета въ случаѣ, если увеличеніе телескопа равно отношенію радиуса отверстія объектива къ радиусу глазного зрачка.

Увеличеніе $Y = \frac{R}{\rho}$ называется *нормальнымъ*.

Надо помнить, что формулы (100) и (101) имѣютъ мѣсто, пока входящія въ нихъ увеличенія (V , N и Y) не меньше соответствующихъ нормальныхъ увеличеній. Въ противномъ случаѣ эти формулы теряютъ свое значеніе и тогда $H = H_0$.

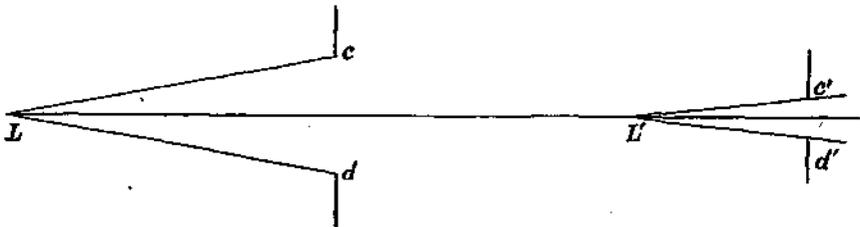
Изъ сказаннаго о яркости вытекаетъ, что ни въ микроскопѣ, ни въ телескопѣ нельзя достигнуть произвольнаго увеличенія безъ потери въ яркости.

Понятно, что при наблюденіи допускается увеличеніе и большее нормальнаго. Предѣлъ увеличенія обуславливается не только яркостью, но и совершенствомъ оптической системы, а особенно этотъ предѣлъ зависитъ отъ достоинства объектива. Съ возрастаніемъ увеличенія возрастаютъ слѣды тѣхъ недостатковъ, о которыхъ мы гово-

рилл (сферическая и хроматическая aberration и т. п.) и чѣмъ больше увеличеніе, тѣмъ отчетливость изображенія слабѣе; наконецъ, при весьма сильномъ увеличеніи изображеніе можетъ сдѣлаться такъ не отчетливымъ, что его лучше разсматривать при меньшихъ увеличеніяхъ.

До сихъ поръ, говоря о яркости, мы предполагали, что свѣтящійся предметъ представляетъ нѣкоторую поверхность. Теперь рассмотримъ случай, когда свѣтящійся предметъ есть точка (напр. неподвижная звѣзда).

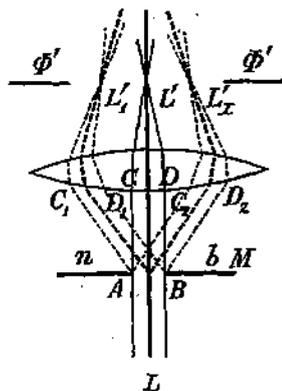
Пусть изображеніемъ свѣтящейся точки L (фиг. 132) будетъ точка L' . Далѣе, пусть cd представляетъ входной зрачекъ, а $c'd'$ —



фиг. 132.

выходной. Понятно, что всѣ лучи, которые входятъ въ систему, заполняютъ входной зрачекъ cd , по выходѣ изъ системы заполняютъ выходной зрачекъ $c'd'$. Поэтому если отверстіе нашего глазного зрачка, помѣщающагося въ плоскости $c'd'$, не меньше отверстія выходного зрачка $c'd'$, то всѣ лучи пучка cLd по выходѣ изъ системы могутъ попасть въ нашъ глазъ. Если L очень далеко, то лучи, идущіе изъ нея, можно считать параллельными. Тогда количество свѣта, попадающаго въ систему, пропорціонально поверхности входного зрачка ея. Такъ какъ система даетъ намъ средство всѣ лучи, попадающіе въ cd , принять въ зрачекъ своего глаза (если только зрачекъ нашего глаза не меньше $c'd'$), то яркость наблюдаемаго въ приборѣ изображенія L' , будетъ во столько разъ больше яркости свѣтящейся точки L , наблюдаемой невооруженнымъ глазомъ, во сколько разъ количество свѣта, попадающаго изъ L во входной зрачекъ cd , превосходитъ количество свѣта, попадающаго непосредственно изъ той же точки L въ зрачекъ нашего глаза, т. е. во сколько разъ поверхность cd больше поверхности зрачка глаза. Вотъ почему звѣзды черезъ телескопъ кажутся гораздо ярче, чѣмъ при наблюденіи ихъ невооруженными глазами. А такъ какъ яркость яснаго неба, какъ свѣтящейся поверхности, при сильномъ увеличеніи кажется черезъ телескопъ весьма слабой, то неудивительно, что въ сильные телескопы даже днемъ можно видѣть звѣзды на небѣ.

§ 71. Вторичное изображение. Через микроскопъ обыкновенно разсматриваются предметы не самосвѣтящіеся, а освѣщенные постороннимъ источникомъ свѣта. Изображенія такихъ несамосвѣтящихся предметовъ проходятъ въ микроскопѣ согласно особенной теоріи Аббэ. Эта теорія основана на диффракціи и интерференціи свѣта. Постараемся уяснить себѣ сущность этой теоріи. Положимъ, что небольшое отверстіе AB , сдѣланное въ непрозрачной преградѣ M (фиг. 133), прикрыто сѣткою, состоящую изъ ряда параллельныхъ весьма узкихъ щелей одинаковой ширины и находящихся на одинаковыхъ разстояніяхъ другъ отъ друга. Совокупность такихъ щелей называется *диффракціонною рѣшеткою*. Число щелей въ такой рѣшеткѣ можетъ простираться до 100 на 1 мм., а то и больше. Будемъ думать, что направленіе щелей перпендикулярно къ плоскости чертежа. Пусть въ отверстіе AB , прикрытое упомянутою сѣткою, падаетъ пучекъ LAB параллельныхъ лучей отъ весьма отдаленнаго источника свѣта L , который для простоты разсужденій будемъ себѣ представлять, какъ свѣтящуюся линію, параллельную щелямъ сѣтки. На основаніи тѣхъ свѣдѣній о диффракціи свѣта, которыя намъ даетъ физика, мы скажемъ, что при выходѣ изъ отверстія AB этотъ пучекъ распадается на рядъ отдѣльныхъ пучковъ, изъ которыхъ одинъ направляется по первоначальному направленію вдоль прямой LL' , а остальные отклоняются отъ этого направленія, располагаясь симметрично по отношенію къ направленію LL' . Для простоты мы изобразили на чертежѣ только два отклоненныхъ пучка ABC_1D_1 и ABC_2D_2 .



фиг. 133.

Направленіе отклоненныхъ (диффракціонныхъ) пучковъ опредѣляется по формулѣ:

$$\sin u_m = \frac{m\lambda}{ne} \dots \dots \dots (1)$$

гдѣ u_m есть уголъ, на который отклоняется данный пучекъ отъ первоначальнаго направленія LL' , m — порядокъ пучка (т. е. первый-ли онъ, или второй, или вообще m -ый), e — ширина щели плюсъ ширина темной полоски, которая отдѣляетъ одну щель отъ другой (съ другой стороны очевидно, что e представляетъ въ то же время разстояніе между сосѣдними линіями, проведенными вдоль щелей по серединѣ ихъ), λ — длина волны свѣта и n — показатель преломленія среды на поверхности стороны ширины M .

Примѣчаніе Считаемъ нужнымъ пояснить формулу (I). Надо замѣтить, что скорость свѣтовой волны въ различныхъ веществахъ различна. Понятно, что съ измѣненіемъ скорости измѣняется и длина свѣтовой волны и чѣмъ скорость больше, тѣмъ длина волны больше; причемъ мы имѣемъ въ виду однородный какой-ниб. свѣтъ, напр. красный. Назовемъ скорость и длину свѣтовой волны для некоторой среды a соответственно черезъ v_a и λ_a , а для среды b — черезъ v_b и λ_b . Тогда можемъ написать пропорцію:

$$\frac{v_a}{v_b} = \frac{\lambda_a}{\lambda_b}.$$

Но на основаніи § 1 имѣемъ:

$$\frac{v_a}{v_b} = \frac{n_b}{n_a},$$

гдѣ n_a и n_b соответственно обозначаютъ показатели преломленія средъ a и b . Значитъ:

$$\frac{n_b}{n_a} = \frac{\lambda_a}{\lambda_b},$$

откуда имѣемъ:

$$\frac{n_b}{n_a} \lambda_b = \lambda_a.$$

Теперь предположимъ, что среда a — воздухъ; тогда послѣдняя формула переписется такъ:

$$n \lambda_b = \lambda \quad (II)$$

гдѣ n — показатель прел. среды b по отношенію къ воздуху (§ 1) и λ — длина волны въ воздухѣ.

Въ курсахъ физики выводится формула:

$$\sin u_m = \frac{m\lambda}{e}$$

для случая, когда диффракція происходитъ въ воздухѣ. Но нетрудно видѣть, что если бы диффракція происходила не въ воздухѣ, а въ другой средѣ (напр. въ b , какъ это у насъ предполагается на черт. — фиг. 133), то и для такого случая мы бы получили формулу:

$$\sin u_m = \frac{m \lambda_b}{e},$$

гдѣ λ_b по прежнему обозначаетъ длину свѣтовой волны въ средѣ b , при чемъ безразлично, какая среда подъ ширною M .

Подставляя въ эту формулу вмѣсто λ , его значеніе, взятое изъ ур. (II), мы получимъ:

$$\sin u_m = \frac{m\lambda}{ne},$$

а это и есть формула (I).

Формула (I) показываетъ, что чѣмъ больше свѣтовая волна λ , тѣмъ сильнѣе отклоненіе. Если допустить, что свѣтъ пучка LAB есть, наприм. красный, то и вышедшіе пучки будутъ красными. Положимъ, что вышедшіе пучки встрѣчаютъ собирательную линзу S , тогда (почти) во второй фокусной плоскости $\Phi'\Phi'$ получатся красныя линіи: $L', L'_1, L'_2 \dots L'_I, L'_{II} \dots$ и т. д., параллельныя щелямъ свѣткы AB , которыя (красныя линіи) представляютъ изображенія линіи L .

Надо замѣтить, что интенсивность свѣта означенныхъ линій быстро падаетъ по мѣрѣ увеличенія значенія порядка m . Если интенсивность средней линіи L' принять равнымъ единицѣ, то интенсивность слѣдующихъ линій выразится, какъ $\frac{1}{20}, \frac{1}{50}$ и т. д. Поэтому, чѣмъ линія дальше отъ средней L' , тѣмъ труднѣе бываетъ ее замѣтить. Если пучекъ LAB будетъ бѣлымъ, то въ фокусной плоскости $\Phi'\Phi'$ по срединѣ получится неотклоненная бѣлая линія L' , а по обѣимъ ея сторонамъ расположатся спектры $L'_1, L'_2 \dots L'_I, L'_{II} \dots$ и т. д. которыхъ интенсивность такъ же точно быстро падаетъ по мѣрѣ увеличенія порядка ихъ. Среднее изображение L' будемъ называть нулевымъ спектромъ. Нетрудно сообразить на основаніи формулы (I), что красный край каждаго спектра (не включая L') будетъ дальше отстоять отъ L' , чѣмъ синий, такъ какъ длина волны λ красного луча больше длины волны для синяго.

Если бы на время допустить, что вмѣсто свѣтящейся линіи L взята одна лишь свѣтящаяся точка, то въ общемъ разсужденія остались бы тѣ же, только видъ спектровъ соотвѣтственно измѣнился бы. Но легко понять, что при замѣнѣ свѣтящейся линіи L свѣтящеюся точкою изъ диффракціонныхъ спектровъ $L'; L'_1 \dots L'_I \dots$ и т. д. выходили бы лучи, способные интерферировать, такъ какъ первоначальнымъ ихъ источникомъ служила бы одна и та же точка L § 69. Сказанное относительно одной свѣтящейся точки относится и ко всемъ точкамъ свѣтящейся линіи L . Значить, если L свѣтящаяся линія (или даже вообще свѣтящаяся поверхность), то изъ соотвѣствующихъ ей спектровъ $L', L'_1, L'_2 \dots$ и т. д. идетъ масса лучей, способныхъ интерферировать.

Чтобы изслѣдовать, въ чемъ именно проявится интерференція означенныхъ лучей, мы перейдемъ къ новому чертежу (фиг. 134).

Ограничимся рассмотрѣніемъ лучей, исходящихъ изъ осевой точки свѣтящагося источника L и прежде всего опредѣлимъ разстояніе между спектрами ея L' , L'_1 , L'_2 и т. д., расположенными въ фокусн. плоскости $\Phi'\Phi'$. Осевая точка L доставитъ намъ свѣтовой пучекъ LAB . При выходѣ этого пучка изъ AB образуются диффракціонные пучки. Обозначимъ углы наклоненій этихъ диффракціонныхъ пучковъ черезъ u_1, u_2, \dots и т. д. Главные лучи этихъ пучковъ, выходя изъ осевой точки C , идутъ по выходѣ изъ чечевицы S въ точку C' , сопряженную съ C , образуя съ осью LC' нѣкоторые углы u'_1, u'_2, \dots и т. д. очень малые, какъ это и бываетъ въ микроскопахъ. Кроме того мы принимаемъ, что система S апланатическая относительно точекъ C и C' ; слѣдовательно для всякой пары сопряженныхъ угловъ наклоненія u_k и u'_k имѣетъ мѣсто равенство:

$$\sin u'_k = \frac{1}{\beta} n \sin u_k.$$

Но такъ какъ $\angle u'_k$ очень малъ, то получимъ:

$$u'_k = \frac{1}{\beta} n \sin u_k \dots (III)$$

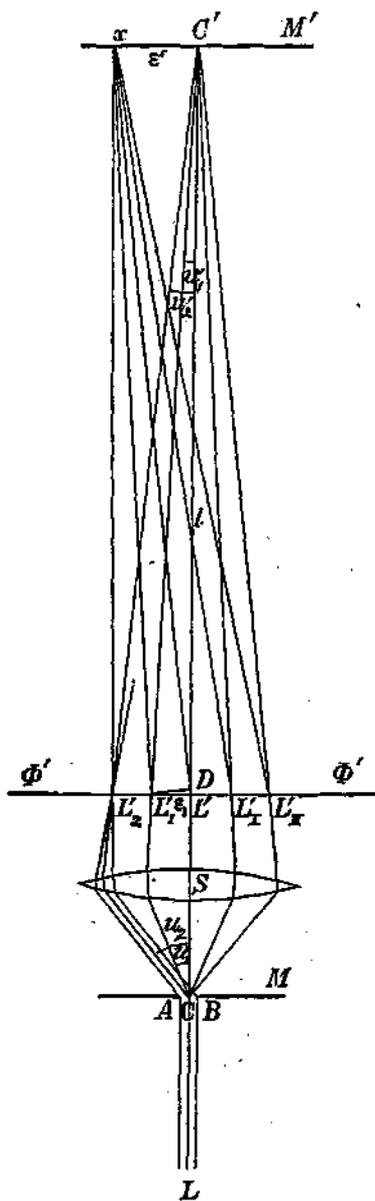
Пусть $CC' = l$ и пусть буквы $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_m, \dots$ обозначаютъ разстоянія спектровъ L'_1, L'_2, \dots, L'_m отъ осевой точки L' . Тогда изъ прямоуго. треугольника $L'_1C'L'$ будемъ имѣть: $L'_1L' = L'C' \cdot \operatorname{tg} \angle L'_1C'L'$ или $L'_1L' = \epsilon_1 = -l \operatorname{tg} u'_1$, гдѣ $\angle u'_1$ согласно § 4 отрицательный.

Такъ какъ уголъ u'_1 очень малъ,

$$\epsilon_1 = -l u'_1.$$

то можемъ написать:

Нетрудно сообразить, что и вообще будетъ имѣть мѣсто урав. такое:



фиг. 134.

$$\epsilon_m = -l u'_m,$$

которое на основании ур. (III) переписется такъ:

$$\epsilon_m = -\frac{l}{\beta} n \sin u_m \dots \dots \dots (IV)$$

Но мы имѣли формулу § 18 — (40)

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{x'}{f'},$$

которую применительно къ нашему случаю перепишемъ такъ:

$$\beta = \frac{x'}{-f'},$$

гдѣ подѣ x' будемъ понимать разстояніе изображенія C' отъ второго фокуса Φ' , который (почти) совпадаетъ съ L' и слѣдоват. $x' = l$; а f' обозначаетъ абсолютную величину второго фокуснаго разстоянія F' системы S . Поэтому окончательно можемъ написать:

$$\beta = \frac{l}{-f'}.$$

Тогда урав. (IV) переписется такъ:

$$\epsilon_m = f' n \sin u_m \dots \dots \dots (V)$$

Но на основании ур. (I) послѣднее урав. еще переписнется такъ:

$$\epsilon_m = f' \frac{m\lambda}{e}.$$

Придавая буквѣ m послѣдовательно значенія 1, 2, 3 . . . m , мы получимъ рядъ равенствъ:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= f' \frac{\lambda}{e} \\ \epsilon_2 &= f' \frac{2\lambda}{e} \\ \dots &\dots \\ \epsilon_m &= f' \frac{m\lambda}{e} \end{aligned} \right\} (VI)$$

Формулы (VI) показываютъ, что разстояніе каждаго двухъ смежныхъ спектровъ одно и то же и равно $\frac{f'\lambda}{e}$. Это разстояніе очевидно тѣмъ больше, чѣмъ меньше e (т. е. чѣмъ меньше разстояніе штриховъ сѣтки AB) и чѣмъ больше f' (т. е. абсолютная величина второго фокуснаго разстоянія системы S) и длина волны λ .

Приступая къ разсматриванію интерференціи лучей, выходящихъ изъ упомянутыхъ спектровъ, въ плоскости $C'M'$, сопряженной съ плоск. CM , допустимъ, что разстояніе $l = C'L'$ чрезвычайно велико въ сравненіи съ разстояніемъ ϵ_k , такъ-что даже разстояніе ϵ_m отъ оси CC' для самаго крайняго спектра (еще оказывающаго вліяніе по интенсивности своего свѣта) въ сравненіи съ l ничтожно. Такое обстоятельство дѣйствительно имѣетъ мѣсто въ микроскопахъ. Поэтому лучи, идущіе отъ отдѣльныхъ спектровъ $L', L_1, L_2 \dots L_m$ въ нѣкоторую точку x , можно считать параллельными. Означенные лучи $L'x, L_1x, L_2x \dots L_mx$ имѣютъ своимъ первоначальнымъ источникомъ свѣтящуюся точку L , избранную нами на оси CC' ; слѣдов. они способны другъ съ другомъ интерферировать. Чтобы рѣшить, какое свѣтовое дѣйствіе произойдетъ въ x отъ совокупнаго дѣйствія всѣхъ означенныхъ лучей, мы опредѣлимъ разницу въ пути для двухъ лучей, напр. $L'x$ и L_1x , исходящихъ изъ двухъ смежныхъ спектровъ: нулевого L' и перваго лѣваго L_1 . Замѣтимъ кстатѣ, что эта разница будетъ одна и та же для каждыхъ двухъ другихъ лучей, исходящихъ изъ двухъ смежныхъ спектровъ, напр. изъ L_1 и L_2 , потому что всѣ лучи, идущіе изъ спектровъ въ x , какъ сказано раньше, считаются параллельными. Разница въ пути ихъ происходитъ отъ наклоненія ихъ къ оси CC' . Обозначимъ эту разницу черезъ r и найдемъ выраженіе для нея. Опустимъ изъ точки L_1 на линію $L'x$ перпендикуляръ L_1D ; тогда $L'D$ представитъ разницу въ пути для двухъ параллельныхъ лучей L_1x и $L'x$. Такъ какъ $\angle L'L_1D = \angle xL'C'$, то $\triangle L_1L'D \sim \triangle xL'C'$; слѣдовательно:

$$\frac{L'D}{L_1L'} = \frac{x C'}{x L'}$$

Принемъ $x C' = \epsilon'$, при чемъ замѣтимъ, что въ знаменателѣ отношенія $\frac{x C'}{x L'}$ безъ замѣтной погрѣшности можно принять $x L' = l$;

тогда получимъ:

$$\frac{L'D}{\epsilon_1} = \frac{\epsilon'}{l} \dots \dots \dots (VII)$$

откуда имѣемъ, что

$$L'D = \frac{\epsilon_1 \cdot \epsilon'}{l} = r.$$

Такъ какъ r представляетъ разницу въ пути для каждыхъ двухъ лучей, исходящихъ вообще изъ двухъ смежныхъ спектровъ, то при $r = \text{четн. числу половинъ } \frac{\lambda}{2}$ отъ дѣйствія каждыхъ двухъ паръ лучей, выходящихъ изъ смежныхъ спектровъ, въ точкѣ x произойдетъ

максимумъ свѣтового дѣйствія, а при $r =$ нечетн. числу полувольтъ $\frac{\lambda}{2}$ въ x будетъ минимумъ свѣтового дѣйствія.

Изъ ур. (VII) находимъ, что

$$e' = r \cdot \frac{l}{\epsilon_1}.$$

Изъ послѣдняго уравненія получимъ положеніе максимумовъ св. дѣйствія, находя ихъ разстоянія e'_k отъ оси CC' .

Разстояніе перваго максимума, втораго, третьаго и т. д. отъ оси CC' получимъ, придавая въ послѣднемъ уравненіи буквѣ r послѣдовательно значенія $0, 2 \cdot \frac{\lambda}{2}, 4 \cdot \frac{\lambda}{2} \dots$ и т. д. и именно будемъ имѣть:

$$\left. \begin{aligned} e'_0 &= 0 \\ e'_1 &= \frac{l}{\epsilon_1} \lambda \\ e'_2 &= 2 \frac{l}{\epsilon_1} \lambda \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \text{(VIII)}$$

гдѣ e'_0 разстояніе отъ оси CC' перваго максимума,

e'_1 „ втораго
 e'_2 „ третьаго

и т. д.

Для перваго максимума разстояніе $e'_0 = 0$; слѣдовательно первый максимумъ лежитъ на оси CC' .

Изъ ур. (VIII) слѣдуетъ, что максимумы свѣтового дѣйствія одинаково отстоятъ другъ отъ друга и нетрудно сообразить, что они симметрично расположены относительно оси CC' .

Мы разсматривали лучи, лежащіе въ плоскости чертежа, но можно было бы рассмотреть и лучи, лежащіе въ другихъ плоскостяхъ, проходящихъ черезъ прямую $L'L_1$ и пересѣкающихъ коническіе свѣтовые лучи, исходящіе изъ спектровъ $L', L'_1, L'_2 \dots$ и т. д. и окончателно пришли бы къ заключенію, что въ плоскости $C'M'$ получаются свѣтлыя полоски, аналогичныя свѣтовымъ полоскамъ свѣтъ AB .

Обозначая разстояніе между какими нибудь двумя сосѣдними максимумами буквою e' , получимъ

$$e' = e'_k - e'_{k-1} = k \frac{l}{\epsilon_1} \lambda - (k-1) \frac{l}{\epsilon_1} \lambda = \frac{l}{\epsilon_1} \lambda,$$

т. е.

$$e' = \frac{l}{\epsilon_1} \lambda \dots \dots \dots \text{(IX)}$$

Но $\epsilon_1 = f' \frac{\lambda}{e}$; следовательно

$$e' = \frac{le}{f'} \dots \dots \dots (X)$$

Для двух сопряженных плоскостей CM и $C'M'$ на основании § 20 линейное увеличение B выразится такъ:

$$B = \frac{x'}{F'} = \frac{l}{F'}$$

откуда при условіи, что $N = \text{абс. в. } B$ и $f' = \text{абс. в. } F'$, получимъ:

$$N = \frac{l}{f'}$$

следовательно

$$e' = Ne \dots \dots \dots (XI)$$

Последнее равенство (XI) позволяет нам вывести нѣсколько важныхъ заключеній:

1). Оно показываетъ, что разстояніе между полосками, происходящими въ плоскости $C'M'$, не зависитъ отъ длины волны; поэтому при бѣломъ источникѣ свѣта онѣ будутъ бѣлыми.

2). Разстояніе между означенными полосками въ N разъ больше разстоянія между полосками сѣтки AB , при чемъ N представляетъ увеличеніе системы S для двухъ сопряженныхъ плоскостей M и M' .

Вотъ эти то полоски, образующіяся въ плоскости M' вслѣдствіе интерференціи, и представляютъ *вторичное* изображеніе. Это изображеніе есть единственное изображеніе отъ несамосвѣтящейся сѣтки AB , получающееся въ плоскости M' , сопряженной съ плоскостью M , въ присутствіи источника свѣта L . Если бы мы въ плоскости M' построили изображеніе сѣтки AB , лежащей въ плоскости M , по тѣмъ же законамъ, которые нами изложены въ геометрической оптикѣ, то очевидно это геометрическое изображеніе совпало бы со вторичнымъ изображеніемъ, потому что разстояніе между полосками геометрическаго изображенія такъ же точно, какъ и разстояніе между полосками вторичнаго изображенія, было бы въ N разъ больше разстоянія полосокъ сѣтки AB , при чемъ очевидно въ обоихъ изображеніяхъ полоска C изображалась бы въ томъ же мѣстѣ C' .

Изъ всего сказаннаго въ этомъ параграфѣ видно, что лучи, выходящіе изъ источ. L , даютъ диффракціонные спектры $L', L'_1, L'_2 \dots$ и т. д., которые суть ничто иное, какъ изображенія источника свѣта L (*первичное* изображеніе). Идя же дальше, тѣ же лучи вызываютъ въ плоскости M' вслѣдствіе интерференціи вторичное изображеніе, но уже не источника свѣта, а сѣтки AB .

Препараты, предназначенные для разсматриванія въ микроскопѣ, часто имѣютъ структуру (строеніе) настолько мелкую, что она дѣйствуетъ, какъ сѣтка, т. е. если бы мы сѣтку AB устранили и замѣнили ее упомянутымъ препаратомъ, то произошло бы явленіе, аналогичное съ тѣмъ, какое мы видѣли въ случаѣ сѣтки.

Аббэ вообще доказалъ, что только тогда въ микроскопѣ можетъ произойти изображеніе несамосвѣтящагося предмета, сходное съ послѣднимъ до мельчайшихъ подробностей во всѣхъ деталяхъ, когда объективъ S ведетъ всѣ диффракціонные пучки, образующіеся при прохожденіи свѣта черезъ предметъ, и что, напротивъ, въ микроскопическомъ изображеніи предмета не будетъ вообще ничего видно, если кромѣ неотклоненнаго (бѣлаго) пучка въ объективъ не попадетъ хотя бы одинъ отклоненный пучекъ, и точное вычисленіе показываетъ, что совпаденіе вторичнаго изображенія съ геометрически построеннымъ изображеніемъ совершается до мельчайшихъ подробностей структуры только тогда, когда всѣ *) отклоненные пучки принимаютъ участіе въ происхожденіи (образованіи) изображенія.

Но не надо упускать изъ виду и того обстоятельства, что изображеніе, происходящее въ плоскости M' (фиг. 134), уже является похожимъ на предметъ, находящійся въ плоскости M , и въ N разъ больше его даже и въ томъ случаѣ, если дѣйствуютъ только два смежныхъ диффракціонныхъ спектра, напр. нулевой L' и первый L'_1 . Къ такому заключенію можно прійти на основаніи даже тѣхъ элементарныхъ соображеній, которыя мы выше изложили по поводу этихъ спектровъ и ихъ роли въ происхожденіи изображенія. Если же заставить дѣйствовать только нулевой спектръ L' , а остальные закрыть, то лучи, исходя изъ L' и падая на поверхность M' будутъ освѣщать ее менѣе болѣе равномерно, не давая никакого изображенія.

Значитъ, намъ выясняется слѣдующій фактъ. Когда въ микроскопѣ, котораго объективъ — S (фиг. 134), получается изображеніе несамосвѣтящагося предмета AB съ весьма тонкою структурой, освѣщаемого нѣкоторымъ источникомъ свѣта L , то хотя бы весьма узкій центральный (неотклоненный) пучекъ свѣта, прямо падающій на объективъ S , занималъ только незначительную часть объектива по срединѣ его, все-таки остальная часть объектива занята отклоненными лучами, которые болѣе слабы по свѣту и могутъ быть незамѣтными для глаза, но они абсолютно необходимы, если мы желаемъ, чтобы изображеніе получалось вѣрное по сходству съ предметомъ.

*) Подъ словомъ „всѣ“ понимаются всѣ тѣ диффракціонные пучки, которые по силѣ интенсивности своего свѣта еще могутъ быть приняты въ расчетъ при образованіи изображенія.

§ 72. Границы оптического наблюдения. (Воспроизводительная способность микроскопа). Предложимъ себѣ задачу: опредѣлить такое наименьшее разстояніе e между штрихами сѣтки, при которомъ изображеніе сѣтки, наблюдаемое въ микроскопѣ, еще сходно съ нею (сѣткою), при чемъ предположимъ, что источникъ свѣта L (фиг. 134) на оси и посылаетъ вдоль оси узкій пучекъ параллельныхъ лучей на крошечный предметъ AB . Такое освѣщеніе называется *центральной* въ отличіе отъ *косого*, при которомъ источникъ свѣта находится не на оси, а въ сторонѣ отъ нея.

Для рѣшенія предложенной выше задачи воспользуемся знакомымъ уже намъ уравненіемъ:

$$\sin u_m = \frac{m \lambda}{n e} \dots \dots \dots (I)$$

Изъ котораго получаемъ

$$e = \frac{m \lambda}{n \sin u_m}$$

Принимая въ этой формулѣ $m = 1$, получимъ

$$e = \frac{\lambda}{n \sin u_1} \dots \dots \dots (XII)$$

гдѣ подъ u_1 понимается уголъ, образуемый съ осью первымъ отклоненнымъ пучкомъ, который необходимо долженъ попадать въ объективъ (кромѣ центрального неотклоненнаго пучка) для того, чтобы изображеніе, наблюдаемое въ микроскопѣ, было уже похоже на предметъ. Значеніе e тѣмъ меньше, чѣмъ больше n и u_1 . Очевидно, что наибольшее значеніе u_1 равно половинѣ углового отверстія объектива. Обозначивъ угловое отверстіе объектива черезъ $2U$, мы получимъ максимальное значеніе для u_1 , равное U и формула (XII) при $u_1 = U$ переищется такъ:

$$e = \frac{\lambda}{n \sin U} \dots \dots \dots (XIII)$$

или

$$e = \frac{\lambda}{a} \dots \dots \dots (XIV)$$

гдѣ $a = n \sin U =$ нумерич. аперт. микроскопа.

Мы видѣли раньше, что нумерическая апертура имѣетъ большое значеніе въ смыслѣ, какъ мѣра количества воспринимаемыхъ системою лучей, но послѣднее ур. (XIV) показываетъ, что отъ величины нумерич. апертуры зависитъ еще и воспроизводительная способность микроскопа: чѣмъ нумер. апертура больше, тѣмъ меньше e , т. е. тѣмъ гуще могутъ идти штрихи сѣтки и все-таки они могутъ быть

видны въ микроскопѣ, какъ отдѣльными линіи. Теоретически наибольшее значеніе для углового отверстія $2U$ есть 180° (на практикѣ оно нѣсколько меньше). Подставляя вмѣсто U максимальное его значеніе 90° , изъ ур. (XIII) получимъ:

$$e = \frac{\lambda}{n}.$$

Предположимъ, что середина между предметомъ и объективомъ есть воздухъ; тогда система называется *сухой*. Поэтому для сухой системы:

$$e = \lambda,$$

т. е. при помощи сухой системы только при отверстіи въ 180° можно было бы наблюдать штрихи, которые отстоятъ другъ от друга на разстояніи, равномъ длинѣ свѣт. волны λ , т. е. иначе говоря, каждая двѣ точки, между которыми разстояніе $= \lambda$, еще казались бы въ микроскопѣ несливающимися. Этимъ бы опредѣлялась предѣльная точность структуры, различаемой при помощи микроскопа. А такъ какъ угловое отверстіе на практикѣ не можетъ быть равнымъ 180° , то для сухой системы означенное значеніе e служитъ лишь предѣломъ, далѣе котораго невозможно идти.

Если между предметомъ и объективомъ находится нѣкоторая жидкость (вода, кедровое масло, однобромонафталинъ и т. п.) то система называется *иммерсионною* или *погружною* и для нея

$$e = \frac{\lambda}{n};$$

слѣдовательно

$$e = \frac{\lambda}{1,33} \dots \text{въ случаѣ водяной иммерсія,}$$

$$e = \frac{\lambda}{1,52} \dots \text{въ случаѣ кедр. масла (однородн. иммерсія)}$$

$$e = \frac{\lambda}{1,66} \dots \text{въ случаѣ однобромонафталиновой иммерсія.}$$

И такъ для e мы получили предѣльную границу:

$$e = \frac{\lambda}{1,66}.$$

Если наблюденіе производится при помощи микрофотографіи, такъ-что дѣйствуютъ главнымъ образомъ синіе лучи H , для которыхъ $\lambda = 0,4 \mu. = 0,0004 \text{ мм.}$, то для e получается значеніе:

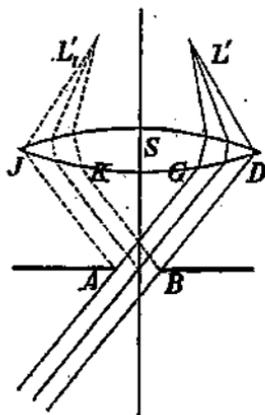
$$e = \frac{0,0004}{1,66} \text{ мм.} = 0,00024 \text{ мм}$$

или круглымъ числомъ:

$$e = \frac{1}{4000} \text{ mm.}$$

Воспроизводительная способность микроскопа можетъ еще увеличиться, если воспользоваться косымъ освѣщеніемъ. Если приспособить освѣщеніе такъ, чтобы неотклоненный пучекъ $ABGD$, проходящій прямо черезъ предметъ AB , достигалъ края объектива S (фиг. 135), то въ объективѣ, очевидно, можетъ попасть еще и первый диффракціонный пучекъ $ABJK$, который

отклоненъ отъ пучка $ABGD$ на уголъ въ два раза большій, чѣмъ при центральномъ освѣщеніи: въ нашемъ случаѣ этотъ уголъ равенъ угловому отверстію объектива $2U$. Значитъ, въ отношеніи воспроизводительной способности при косомъ освѣщеніи система съ углов. отв. U такъ дѣйствуетъ, какъ дѣйствуетъ система съ угловымъ отверстіемъ $2U$, но, при центральномъ освѣщеніи. Слѣдовательно нетрудно сообразить, что при косомъ освѣщеніи предѣльное наибольшее разстояніе между нулевымъ и первымъ спектрами (т. е. $U'U'_1 = e_1 = f' \frac{\lambda}{e}$) можетъ быть



фиг. 135.

приблизительно вдвое больше такого же разстоянія при центральномъ освѣщеніи, а слѣдовательно при косомъ освѣщеніи предѣльное значеніе e можетъ быть вдвое меньше предѣльнаго значенія e при центр. освѣщеніи, такъ какъ изъ выраженія

$$e = \frac{f' \lambda}{e}$$

слѣдуетъ, что значеніе e обратно пропорціонально значенію e . Поэтому если при центральномъ освѣщеніи граница оптическаго наблюденія выражается, какъ

$$e = 0,00024 \text{ mm.},$$

то при косомъ освѣщеніи за такуюю границу можно принять

$$e = 0,00012 \text{ mm.}$$

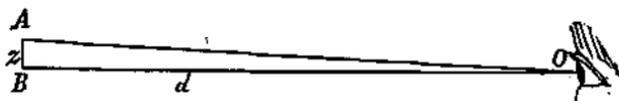
т. е. даже при косомъ освѣщеніи не возможно уже различать двухъ точекъ, отстоящихъ другъ отъ друга на разстояніи

$$e = 0,00012 \text{ mm.}$$

Замѣтимъ, что если освѣщающій коническій пучекъ очень широкъ, т. е. угловое его отверстіе значительно, такъ-что онъ занимаетъ всю поверхность объектива, то даже при центральномъ освѣщеніи

есть возможность различать такіа структуры, которыя въ случаѣ такого освѣщающаго пучка видны лишь при косомъ освѣщеніи. Это объясняется тѣмъ, что крайніе лучи такого широкаго пучка занимаютъ такое же положеніе, какъ лучи при косомъ освѣщеніи.

§ 73. Критическое увеличеніе микроскопа. Если воспроизводительная способность даннаго микроскопа выражается величиною предѣльнаго (наименьшаго) разстоянія e , на которомъ должны находиться двѣ точки, чтобы онѣ еще могли въ этомъ микроскопѣ казаться отдѣльными или, какъ иногда говорятъ, могли быть *разрѣшмы* имъ, то это не значитъ, что при всякомъ увеличеніи означенныя точки въ данномъ микроскопѣ покажутся отдѣльными. Это происходитъ оттого, что невооруженный глазъ видитъ двѣ точки отдѣльными, т. е. различаетъ ихъ только въ томъ случаѣ, когда онѣ представляются ему подъ угломъ не слишкомъ малымъ, а минимальное значеніе этого угла приблизительно около двухъ минутъ *). Положимъ, что $AB = z$ представляетъ на чертежѣ (фиг. 136) то протяженіе или, лучше ска-



фиг. 136.

зать, тотъ отрѣзокъ прямой, который виденъ простымъ глазомъ съ разстоянія наилучшаго зрѣнія $BO = d = 250$ мм. подъ угломъ въ $2'$. Тогда, предполагая, что $AB \perp BO$, имѣемъ:

$$AB = OB \operatorname{tg} \angle AOB,$$

откуда

$$z = d \operatorname{tg} 2' = 250 \cdot 0,0005818 = 0,14545 \text{ мм.}$$

Поэтому данный микроскопъ долженъ во столько разъ увеличить упомянутое въ началѣ этого параграфа разстояніе e , чтобы оно нашему глазу показалось въ микроскопѣ по крайней мѣрѣ равнымъ $z = 0,14545$ мм., въ противномъ случаѣ мы не въ состояніи будемъ различать точки (или штрихи), между которыми разстояніе e ; слѣдовательно минимальное требуемое увеличеніе должно быть слѣдующее:

$$N = \frac{z}{e}$$

Такое увеличеніе будемъ называть *критическимъ*.

Оно тѣмъ характерно, что всякое другое увеличеніе, меньшее

*) Если помѣстить передъ глазами линейку съ дѣленіями на миллиметры и удалиться отъ нея, то штрихи (черточки) становятся все менѣе и менѣе замѣтными и наконецъ на нѣкоторомъ разстояніи онѣ совсѣмъ ступшуются на общемъ фонѣ линейки.

критического, очевидно, не даетъ намъ возможности вполне утилизовать воспроизводительную способность микроскопа.

При косомъ освѣщеніи на основаніи ур. (XIV) имѣемъ

$$e = \frac{\lambda}{a} : 2 = \frac{\lambda}{2a};$$

поэтому

$$N = \frac{z \cdot 2a}{\lambda} \dots \dots \dots (102)$$

гдѣ $z = 0,14545$ мм.

Мы видѣли (§ 68), что для микроскопа

$$N = \frac{d}{f'},$$

гдѣ f' абсолютная величина второго фокуснаго разстоянія микроскопа, а d по прежнему разстояніе наилучшаго зрѣнія; слѣдовательно

$$\frac{d}{f'} = \frac{z \cdot 2a}{\lambda},$$

откуда

$$f' = \frac{d\lambda}{2az},$$

но $z = d \operatorname{tg} 2'$; слѣдовательно

$$f' = \frac{\lambda}{2a \operatorname{tg} 2'} \dots \dots \dots (103)$$

Формулы (102) и (103) представляютъ зависимость критическаго увеличенія и второго фокуснаго разстоянія микроскопа отъ чисерической апертуры послѣдняго. На основаніи этихъ формулъ составлена ниже помѣщенная таблица.

$$\lambda = 0,55 \mu = 0,00055 \text{ мм.}$$

$a = n \sin U$	e въ микро- нахъ *)	$z = 0,14545$	
		N	f'
0,10	2,75	53	4,72
0,20	1,37	106	2,36
0,30	0,92	159	1,58
0,40	0,69	212	1,18
0,60	0,46	317	0,79
0,75	0,37	397	0,63
0,90	0,31	476	0,52
1,20	0,23	635	0,39
1,40	0,19	741	0,34
1,60	0,17	846	0,30
1,70	0,16	899	0,27

*) Микрона = μ = 0,001 мм.

Чтобы свободнѣе разсматривать изображенія, увеличеніе микроскопа доводить до величины, въ два раза большей той, какая указана въ этой таблицѣ, т. е. для максимальнаго увеличенія микроскопа величину f' подголяютъ къ значенію въ два раза меньшему, чѣмъ указано въ таблицѣ, чего можно достигнуть, применяя болѣе сильный окуляръ.

Не надо забывать, что при изложенныхъ разсужденіяхъ мы подъ микроскопомъ понимали систему на столько совершенную, т. е. на столько свободную отъ извѣстныхъ намъ недостатковъ (абберация и т. п.), что есть возможность допустить указанное увеличеніе.

Замѣтимъ еще, что на практикѣ наивысшее значеніе апертуры, какого удавалось достигнуть, есть 1,6, а лучамъ, сильнѣе всего дѣйствующимъ на глазъ, соответствуетъ $\lambda = 0,00055$ мм. Принимая въ формулѣ (102)

$$a = 1,6 \text{ и } \lambda = 0,00055,$$

получимъ:

$$N = 846 \text{ или круглымъ числомъ } 850.$$

Значитъ число 850 есть увеличеніе, уже достаточное для того, чтобы видѣть все то, что можно видѣть черезъ микроскопъ. А удвоивъ это увеличеніе, мы получимъ максимальное увеличеніе:

$$N = 1700.$$

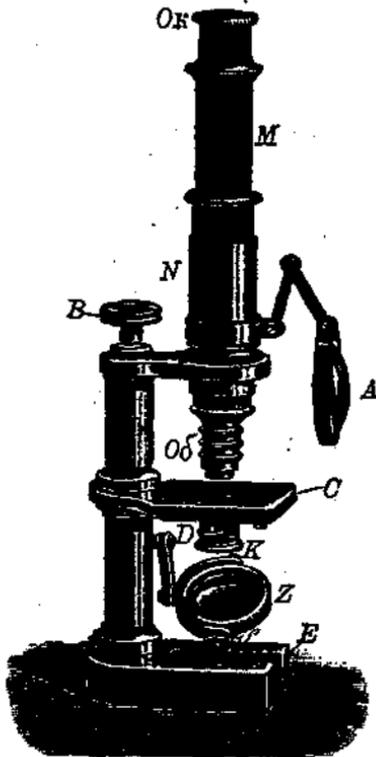
Последнія заключенія выведены въ предположеніи, что разсматриваемый предметъ несамосвѣтящійся и освѣщается снизу.

ГЛАВА IV.

Микроскопъ.

§ 74. **Общія замѣчанія.** Различаютъ два рода микроскоповъ: простой и сложный микроскопы. Каждая собирательная линза можетъ быть разсматриваема, какъ простой микроскопъ. Въ простомъ микроскопѣ предметъ помещается между линзою и фокусомъ ея на такомъ

разстояніи отъ послѣдняго, чтобы мнимое изображеніе $A'L'$ (фиг. 124) находилось отъ глаза наблюдателя на разстояніи наилучшаго зрѣнія. Лучи, выходящіе изъ линзы S и направляющіеся въ глазъ наблюдателя, даютъ возможность видѣть изображеніе $A'L'$, которое будетъ больше самого предмета AL . Объ увеличеніи простого микроскопа мы говорили въ § 68. Для усиленія увеличенія и устранения нѣкоторыхъ недостатковъ въ изображеніи соединяютъ нѣсколько линзъ, которыя равносильны одной съ болѣе короткимъ фокусомъ. Но значительнаго увеличенія при помощи простого микроскопа нельзя достигнуть вслѣдствіе трудности приготовить линзы съ весьма короткими фокусными разстояніями, а также вслѣдствіе того, что линзы съ короткими фокус. разстояніями обладаютъ значительною aberracieю. Пейссъ довелъ увеличеніе въ простомъ микроскопѣ до 120 разъ.



фиг. 137.

Сильное увеличеніе достигается при помощи сложнаго микроскопа. Существенную часть сложнаго микроскопа представляетъ трубка M (фиг. 137), содержащая въ себѣ ту оптическую систему, благодаря

которой мы видимъ изображеніе наблюдаемаго предмета. Оптическая система, заключающаяся въ трубкѣ *M*, состоитъ изъ объектива *Об*, привинчиваемаго къ нижнему концу трубки *M*, и окуляра *Ок*, опускаемаго въ верхнее отверстіе той же трубки *M*. Сама трубка *M* помѣщается въ другой трубкѣ *N* и можетъ въ ней двигаться со слабымъ треніемъ. Трубка же *N* прикрѣплена къ штативу *L*, покоящемуся на ножкѣ *E*, къ тому же штативу прикрѣпленъ столикъ *C* съ отверстіемъ *J*. Столикъ предназначается для помѣщенія разсматриваемаго предмета и называется иногда *предметнымъ*. Самъ предметъ не кладется непосредственно на столикъ, а помѣщается на стеклянную пластинку, которая уже кладется на столикъ *C* такъ, чтобы лежащій на ней предметъ располагался надъ отверстіемъ *J*. Означенная стеклянная пластинка называется *предметнымъ стекломъ*. Подъ столикомъ находится освѣтительный аппаратъ. Необходимую часть послѣдняго составляетъ зеркало *Z*, могущее принимать всевозможныя наклоненія. Во время наблюденія этому зеркалу даютъ такое положеніе, чтобы пучекъ отраженнаго имъ свѣта попадалъ въ отверстіе *J* и освѣщалъ разсматриваемый предметъ. Иногда является необходимымъ съузить освѣщающій пучекъ свѣта. Для этой цѣли въ особую трубку *D*, прикрѣпленную къ нижней поверхности предметнаго столика *C*, вставляется диафрагма съ большимъ или меньшимъ отверстіемъ, смотря по надобности. Для освѣщенія непрозрачныхъ предметовъ служитъ чечевица *A*, которая, подобно зеркалу *Z*, въ опредѣленныхъ предѣлахъ можетъ двигаться и наклоняться по всевозможнымъ направленіямъ.

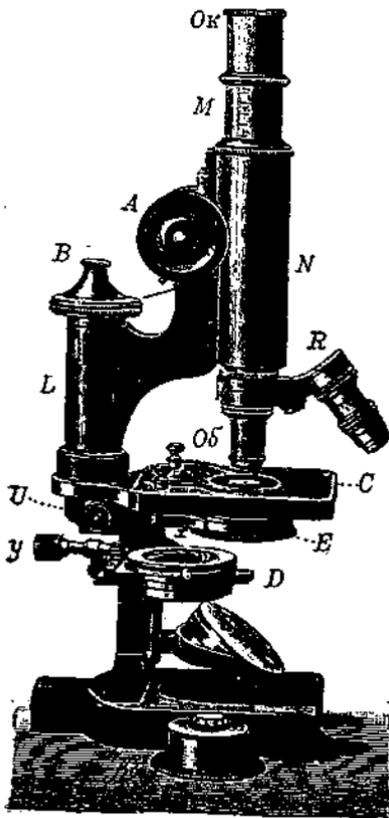
Чтобы сдѣлать освѣщеніе болѣе выгоднымъ въ случаѣ, если объективъ обладаетъ большою апертурою, приходится между предметомъ и зеркаломъ (плоскимъ) помѣщать *конденсаторъ*, состоящій изъ одной или нѣсколькихъ собирающихъ линзъ въ общей оправѣ. О конденсаторѣ будемъ еще говорить въ послѣдствіи подробнѣе.

Расстояніе между нижнимъ и верхнимъ краями трубки *M* называется *длиною* ея. Въ Германіи эта длина подгоняется оптиками приблизительно къ 160 мм. Но вообще она достигаетъ 250 мм.

Для наблюденія предмета черезъ микроскопъ нужно установить объективъ *Об* на опредѣленномъ разстояніи отъ предмета. Грубая установка производится перемѣщеніемъ трубки *M*, а тонкая установка достигается вращеніемъ головки *B* микрометрическаго винта, заключающагося въ стержнѣ *L*. Надо замѣтить, что при грубой установкѣ, поднимая и опускаая трубку *M*, необходимо ее въ то же время вращать въ трубкѣ *N*, чтобы набѣгнуть неожиданнаго и чрезмѣрнаго перемѣщенія трубки *M*, при которомъ можетъ произойти ударъ объектива о предметъ. Обыкновенно поступаютъ такъ. Осторожно дово-

дять объективъ почти до прикосновенія съ наблюдаемымъ предметомъ, затѣмъ выдвигаютъ трубку *M* до тѣхъ поръ, пока глазу, смотрящему въ окуляръ *Ок*, не покажется изображеніе предмета. Тогда прекращаютъ грубую установку и дальше доканчиваютъ установку вращеніемъ головки *B*.

На чертежѣ (фиг. 138) представленъ микроскопъ, котораго устройство болѣе сложно, чѣмъ только что описаннаго. Къ трубкѣ *N* (фиг. 138)



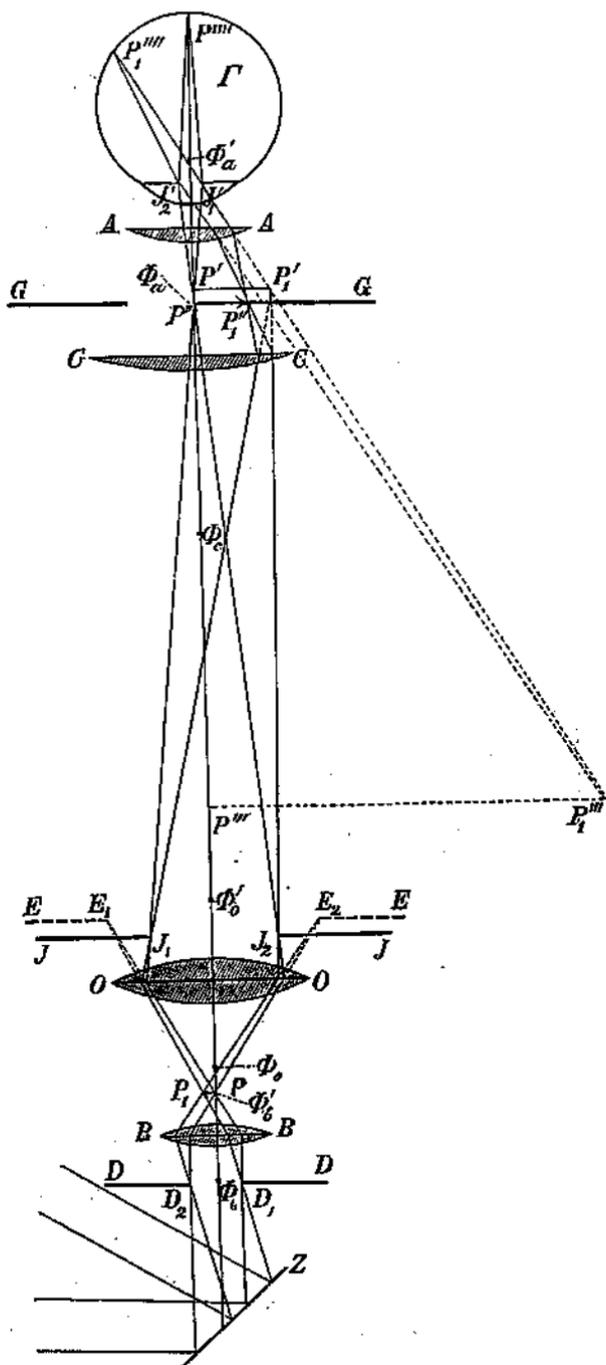
фиг. 138.

прикрѣпленъ такъ называемый *револьверъ R* для завинчиванія объективовъ. Поворачивая револьверъ *R*, можно по произволу пользоваться тѣмъ или другимъ объективомъ. Сама трубка *N* въ такомъ микроскопѣ можетъ передвигаться вверхъ или внизъ при поворачиваніи пуговки *A* и грубая установка достигается именно передвиженіемъ трубки *N*. Что же касается трубки *M*, то она (вручную) можетъ быть выдвинута изъ трубки *N* на извѣстное число дѣленій, которыя нанесены на ея поверхности и показываютъ разстояніе окуляра отъ объектива. Такимъ образомъ въ этомъ микроскопѣ можно измѣнять разстояніе между объективомъ и окуляромъ. Но для сильныхъ объективовъ это разстояніе бываетъ вполне определенное и не можетъ быть сильно измѣнено безъ вреда для изображенія. Подъ столикомъ *С* видѣется вставленная диафрагма *Е*, которую можно вынуть и на мѣсто ея вставить конденсаторъ *К*, изображенный на чертежѣ

ниже зеркала возлѣ ножек штатива. Вставивъ конденсаторъ на мѣсто диафрагмы *Е*, подводятъ подъ него кольцо *D* съ диафрагмою. Пуговка *у* служитъ для передвиженія диафрагмы въ сторону, чтобы въ случаѣ надобности достигнуть косою освѣщенія § 72.

Замѣтимъ еще, что стержень *L* можетъ наклоняться, вращаясь около оси *U*, благодаря чему трубкѣ *N* можно придать наклонное или даже горизонтальное положеніе, что иногда представляетъ большое удобство при занятіяхъ съ микроскопомъ.

Теперь рассмотримъ ходъ лучей въ сложномъ микроскопѣ и ихъ



фиг. 139.

ограничение, чтобы таким образом имѣть болѣе наглядное представление о дѣйствіи оптической системы микроскопа. Для этой цѣли

обратимся къ чертежу (фиг. 139), который съ малыми измѣненіями позаимствованъ нами изъ сочиненія Циммермана *).

Пусть стрѣлка PP_1 представляетъ рассматриваемый предметъ, помѣщенный между конденсаторомъ BB и объективомъ OO . Последний для простоты разсужденій представленъ на чертежѣ въ видѣ простой собирательной линзы. Буквами Φ_0 и Φ'_0 обозначены фокусы объектива. Что же касается окуляра, то онъ составляется обыкновенно изъ двухъ линзъ: *собирательной* CC и *глазной* AA . Фокусы собирательной линзы CC обозначимъ буквами Φ_c и Φ'_c , а фокусы глазной буквами Φ_a и Φ'_a . При правильной установкѣ микроскопа предметъ PP_1 располагается недалеко отъ перваго фокуса Φ_0 объектива OO на разстояніи немного большемъ перваго фокуснаго разстоянія объектива. Чтобы представить себѣ происхожденіе изображенія, мы обратимъ вниманіе на два конуса лучей, выходящихъ изъ крайнихъ точекъ предмета P и P_1 . Небудь собирательной линзы CC , эти конусы по выходѣ изъ объектива OO доставили бы двѣ точки схождения P' и P'_1 , сопряженныя съ P и P_1 и изображеніе предмета PP_1 расположилось бы въ $P'P'_1$; оно было бы дѣйствительное и больше предмета. Но благодаря присутствію собирательной линзы CC , изображеніе въ дѣйствительности располагается въ $P''P''_1$, будучи нѣсколько меньше, чѣмъ $P'P'_1$. Такъ какъ изображеніе $P''P''_1$, располагается между главною линзою AA и ея фокусомъ весьма близко отъ послѣдняго, то лучи, идущіе далѣе отъ точекъ изображенія $P''P''_1$ и падая на глазную линзу AA , доставляютъ мнимое увеличенное изображеніе $P'''P'''_1$ и если послѣднее находится на разстояніи наилучшаго зрѣнія отъ глаза Γ , то свѣтовые пучки лучей, направляясь какъ бы изъ точекъ изображенія $P'''P'''_1$ и попадая черезъ зрачекъ въ глазъ наблюдателя, доставляютъ точки схождения какъ разъ на сѣтчатой оболочкѣ, и на ней располагается дѣйствительное изображеніе $P''''P''''_1$, благодаря чему наблюдатель и воспринимаетъ это изображеніе.

Ограниченіе свѣтовыхъ пучковъ, идущихъ изъ различныхъ точекъ предмета PP_1 , производится при помощи диафрагмы JJ , которая помѣщается позади объектива (на чертежѣ — надъ объективомъ). Пусть E_1E_2 представляетъ изображеніе отверстія J_1J_2 диафрагмы JJ , образуемое объективомъ OO . Тогда на основаніи сказаннаго въ § 65 заключаемъ, что E_1E_2 будетъ входнымъ зрачкомъ, а уголъ E_1PE_2 — угловымъ отверстіемъ объектива или, что одно и то же, всего микроскопа. Желая опредѣлить выходной зрачекъ микроскопа, мы обратимъ вниманіе на то, что лучи, направляющіеся изъ крайнихъ точекъ J_1 и J_2 отверстія диафрагмы JJ , по выходѣ изъ

*) Микроскопъ. — Др. Циммерманъ — переводъ Др. Ильина 1896 г.

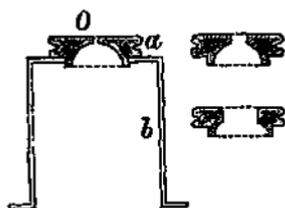
микроскопа пересекаются соответственно въ точкахъ J_1 и J_2 ; поэтому $J_1 J_2$ служить изображеніемъ отверстія $J_1 J_2$, образованнымъ посредствомъ окуляра. Это изображение $J_1 J_2$ и представляетъ выходной зрачекъ микроскопа § 65. Въ нашемъ случаѣ выходной зрачекъ микроскопа совпадаетъ съ зрачкомъ глаза Γ . Чтобы наблюденіемъ опредѣлить положеніе и размѣры выходного зрачка $J_1 J_2$, слѣдуетъ надъ микроскопомъ, начиная отъ глазной линзы AA , передвигать вверхъ кусокъ промасленной бумаги, удерживая послѣднюю горизонтально. Тогда нетрудно будетъ найти такое положеніе бумаги, когда на ней получается рѣзко очерченный свѣтлый кружочекъ, который и есть ничто иное, какъ выходной зрачекъ микроскопа. Принято, что во время такого наблюденія надо стараться, чтобы въ микроскопъ попадалъ сильный коническій пучекъ свѣта.

Въ плоскости изображенія $P''P_1''$, внутри окуляра, помѣщается діафрагма GG , которой назначеніе совсѣмъ не то, что діафрагмы JJ . Діафрагма GG служить для *ограниченія поля зрѣнія*. Какъ показано на чертѣжѣ, лучи пересекающіеся напр. въ точкѣ P_1'' , лежащей на краю діафрагмы GG , имѣютъ другую точку пересѣченія P_1 , расположенную въ плоскости предмета PP_1 и вообще всѣ точки края діафрагмы GG имѣютъ соответственно сопряженные для себя точки въ плоскости предмета PP_1 . Поэтому изображеніе діафрагмы GG , произведенное собирающей линзой CC + объективъ OO , располагается въ плоскости предмета PP_1 . Въ слѣдствіе этого діафрагма GG краями своего отверстія какъ бы отрѣзываетъ въ плоскости предмета опредѣленный кружокъ, который мы и можемъ свободно обозрѣть черезъ микроскопъ, а точекъ лежащихъ внѣ этого кружка въ плоскости предмета мы не увидимъ; такъ какъ онѣ будутъ закрыты, благодаря присутствію тѣлесной діафрагмы GG . Значитъ, эта діафрагма GG и есть ничто иное, какъ *діафрагма поля зрѣнія*, о которой намъ упоминалось въ § 65.

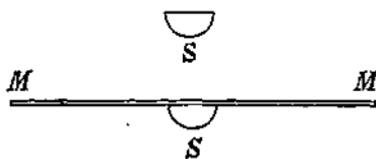
Въ концѣ параграфа 72 мы видѣли, какое значеніе имѣетъ освѣщающій коническій пучекъ свѣта съ большимъ угловымъ отверстіемъ. Для полученія такого пучка и употребляется конденсаторъ BB . На чертѣжѣ (фиг. 189) представленъ такой случай, когда конденсаторъ доставляетъ коническій пучекъ свѣта, какъ разъ выполняющій все угловое отверстіе объектива, при чемъ крайніе точки D_2 и D_1 отверстія діафрагмы DD , расположенной подъ конденсаторомъ BB , суть сопряженные съ точками E_2 и E_1 по отношенію къ системѣ BB ; такъ-что отверстія $E_1 E_2$ и $D_1 D_2$ суть сопряженные, т. е. одно изъ нихъ можно считать изображеніемъ другого. Обратимъ вниманіе на то, что отверстіе $D_1 D_2$ можетъ быть по мѣрѣ приближенія очень малымъ, т. е. на предметъ PP_1 можетъ падать весьма

узкій центральній пучекъ свѣта, а все-таки вся поверхность объектива можетъ быть занята свѣтовыми пучками, такъ какъ согласно сказанному въ § 71 узкій пучекъ свѣта, пройдя черезъ тонкую структуру несамосвѣтющагося предмета, распадается на множество диффракціонныхъ пучковъ, отклоняющихся въ стороны на различные углы и мало того — въ томъ же параграфѣ мы видѣли, что эти диффракціонные пучки необходимы для вѣрности изображенія несамосвѣтющагося предмета съ тонкою структурою.

§ 75. **Освѣтительный аппаратъ.** У слабыхъ микроскоповъ, которые не даютъ значительныхъ увеличеній, освѣтительнымъ аппаратомъ служитъ зеркало, вставленное въ кольцеобразную оправу *Z* (фиг. 137). Обыкновенно въ ту же оправу *Z* вставляются два зеркала: плоское и вогнутое, повернутыя другъ къ другу задними сторонами. Кольцеобразная оправка *Z* способна вращаться на остріяхъ двухъ винтовъ *KK*, такъ-что есть возможность по мѣрѣ надобности пользоваться то тѣмъ, то другимъ зеркаломъ. Въ предыдущемъ параграфѣ мы уже упоминали о томъ, что для ограниченія свѣтового



фиг. 140.

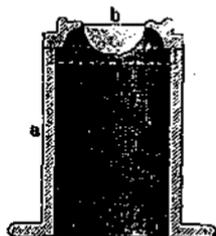


фиг. 141.

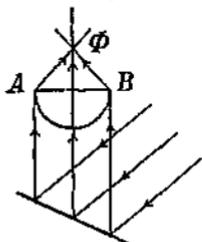
пучка, отбрасываемаго зеркаломъ, употребляются діафрагмы. Очень удобны діафрагмы цилиндрическія (фиг. 140). Цилиндрическая діафрагма состоитъ изъ цилиндрической трубки *b*, въ крышку которой вставляется кружокъ *a* съ малымъ отверстіемъ *O*. Обыкновенно при микроскопѣ имѣется три такихъ кружка, какъ *a*. Каждый кружокъ съ инымъ отверстіемъ. Діаметръ отверстія одного кружка бываетъ примѣрно въ 1 мм., другого — въ 2 мм. и третьяго — въ 4 мм. Желая пользоваться діафрагмою, вставляютъ въ крышку трубки *b* одинъ изъ означенныхъ кружковъ и затѣмъ саму трубку *b* вдвигаютъ въ трубку *D* (фиг. 137). Достоинство цилиндрической діафрагмы то, что ее можно въ трубкѣ *D* (фиг. 137) поднимать и опускать, благодаря чему есть возможность непрерывно измѣнять ограниченіе освѣщающаго пучка.

Для достиженія сильнаго увеличенія приходится пользоваться объективомъ, у котораго угловое отверстіе велико и тогда одно зеркало является недостаточнымъ освѣтительнымъ аппаратомъ и въ помощь ему присоединяется конденсаторъ. Простѣйшій видъ конден-

сатора представляет линза S въ видѣ полушарія (фиг. 141), которая прикрѣпляется къ предметному стеклу M снизу посредствомъ канадскаго бальзама или глицерина или просто при помощи капли воды. Но то же полушаріе часто закрѣпляется въ цилиндрическую оправу (фиг. 142). Эта оправа съ полушаріемъ въ случаѣ надобности вставляется въ ту же цилиндрическую трубку D (фиг. 137), о которой говорилось раньше. На основаніи тѣхъ правилъ, которыя изложены нами въ началѣ этого сочиненія (въ геометрической оптикѣ), легко можно вычислить угловое отверстіе освѣщающаго конуса, доставляемаго линзою — въ видѣ полушарія. Если предположить, что полушаріе сдѣлано изъ кронгласа съ показателемъ преломленія $n_D = 1,52$, то угловое отверстіе $\Delta \Phi B$ (фиг. 143) выходящаго изъ полушарія свѣтового конуса будетъ равно приблизительно 74° . Конечно, крайніе лучи $A\Phi$ и $B\Phi$ будутъ весьма слабы, такъ какъ свѣтъ, падая весьма наклонно на края сферической поверхности въ A и B , въ значительной мѣрѣ отражается.



фиг. 142.



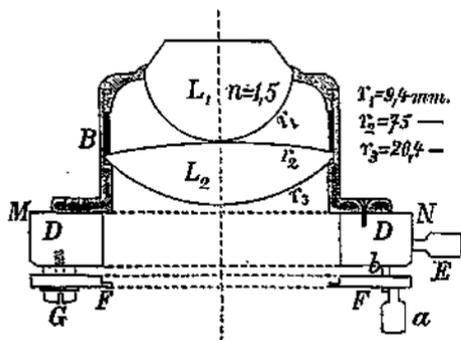
фиг. 143.

Для полученія свѣтового конуса съ очень большимъ угловымъ отверстіемъ строятъ конденсаторы, состоящіе изъ двухъ или даже трехъ линзъ. Линзы, входящія въ составъ конденсатора, не ахроматичны. Обыкновенно онѣ дѣлаются изъ кронгласа, но иногда и изъ флинтгласа. На чертежѣ (фиг. 144) мы старались, на сколько это было возможно, точно скопировать одинъ изъ конденсаторовъ, который былъ у насъ подъ руками. Такого рода конденсаторы

очень распространены въ нынѣшнее время и называются *осветительными аппаратами Аббэ*. Въ трубку B , заштрихованную на чертежѣ, свободно вложена линза L_2 , затѣмъ на нее положено кольцо, которое аккуратно входитъ въ трубку B и занимаетъ въ высоту около 5 мм., а сверху въ ту же трубку B ввинчена оправа съ линзою L_1 . Собственно самъ конденсаторъ на чертежѣ занимаетъ верхнюю часть до черты MN . Снизу къ конденсатору привинчено кольцо DD съ диафрагмою ирисъ, которой особенность та, что вращая пуговку E въ ту или другую сторону, можно отверстіе самой диафрагмы *непрерывно* уменьшать или увеличивать. Подъ диафрагмою находится кольцо FF . Отвернувъ въ сторону кольцо FF , вращая его около оси G , можно вложить въ него кружокъ синяго или матоваго стекла и затѣмъ подвести кольцо подъ конденсаторъ на прежнее мѣсто до прикосновенія пуговки a къ штифту b . Синее или матовое

стекло вкладывается въ упомянутое кольцо въ томъ случаѣ, когда работаютъ при лампѣ.

Конечно, различные оптики строятъ конденсаторы различно. На чертежѣ (фиг. 138) изображенъ микроскопъ, у котораго диафрагма



фиг. 144.

присъ *D* не соединена неизмѣнно съ конденсаторомъ. Пуговка служащая для уменьшенія или увеличенія отверстія диафрагмы, обозначена на этомъ чертежѣ бѣлымъ пунктомъ, а о назначеніи пуговки *у* мы уже говорили раньше § 74.

Конденсаторъ устанавливаются такимъ образомъ, чтобы вершина освѣщающаго конуса приходилась примѣрно въ томъ же мѣстѣ, гдѣ располагается

разсматриваемый предметъ. Но такъ какъ предметныя стекла, на которыхъ помѣщается предметъ, бываютъ разной толщины, то въ виду этого конденсаторъ приспособляется такъ, чтобы была возможность по мѣрѣ надобности поднимать и опускать его, пока упомянутая вершина освѣщающаго луча не достигнетъ разсматриваемаго предмета. Но въ общемъ конденсаторъ устанавливается такъ, чтобы плоская поверхность верхней чечевицы (линзы) приходилась приблизительно на одной высотѣ съ верхнею поверхностью столика. Для отраженія свѣта въ конденсаторъ пользуются плоскимъ зеркаломъ. При наблюденіи съ микроскопомъ лучше всего пользоваться дневнымъ свѣтомъ, особенно выгодно для наблюденія, когда на небѣ бѣлыя легкія облака. Микроскопъ во время наблюденія помѣщаютъ на разстояніи примѣрно 1 метра (а то и дальше) отъ окна, обращеннаго на сѣверь.

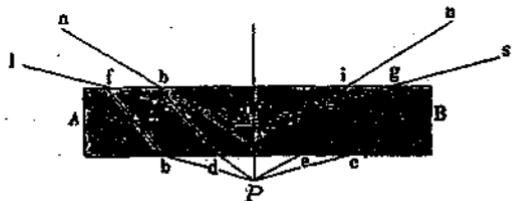
Замѣтимъ еще, что диафрагма—не маловажная часть въ освѣтительномъ аппаратѣ и во время работъ съ микроскопомъ слѣдуетъ, не отрывая глазъ отъ изображенія, измѣнять отверстіе диафрагмы до тѣхъ поръ, пока оно не приметъ размѣра, самаго выгоднаго для изображенія, при чемъ, если имѣемъ дѣло съ цилиндрическими диафрагмами, то кромѣ измѣненія отверстія слѣдуетъ измѣнять и положеніе ихъ подниманіемъ или опусканіемъ. При сильномъ увеличеніи необходимо сильное освѣщеніе, а при слабомъ увеличеніи выгоднѣе ослабить освѣщеніе, уменьшая отверстіе диафрагмы. Если при слабомъ увеличеніи, но сильномъ освѣщеніи, станемъ разсматривать прозрачную стеклянную пластинку съ нанесенными на ней весьма тонкими дѣленіями, то мы этихъ дѣленій можемъ не замѣтить, хотя

бы микроскопъ былъ установленъ на нихъ правильно. Но стоитъ только сдвинуть отверстие диафрагмы и дѣленія могутъ сдѣлаться замѣтными.

§ 76. **Покровное стекло и иммерсія.** Во избѣжаніе нежелательнаго вообще прикосновенія объектива къ разсматриваемому предмету, послѣдній прикрываютъ сверху тонкимъ стеклышкомъ, которое называется *покровнымъ*. Оно должно быть тонкимъ для того, чтобы нижняя поверхность объектива могла дойти весьма близко къ наблюдаемому предмету, что необходимо, если система сильная. Въ сильныхъ системахъ разстояніе предмета отъ нижней поверхности объектива бываетъ значительно меньше одного миллиметра. Средняя толщина покровнаго стекла около 0,15 мм.

Присутствіе покровнаго стекла вліяетъ на ходъ лучей, идущихъ отъ наблюдаемаго предмета. Лучи, вышедшіе отъ предмета, проходя черезъ покровное стекло, претерпѣваютъ въ немъ преломленіе прежде, чѣмъ попасть въ объективъ. Вотъ почему при вычисленіи объектива, не предназначеннаго для иммерсіи, необходимо брать во вниманіе и покровное стекло. Фиг. 145 примѣрно показываетъ ходъ лучей, направляющихся отъ предмета *P* и проходящихъ черезъ покровное стекло.

Сильный объективъ во время наблюденій замѣтно даетъ менѣе благоприятныя результаты, если примѣняется покровное стекло иной толщины, чѣмъ для какой онъ вычисленъ. Этотъ недостатокъ, происходящій отъ разницы въ

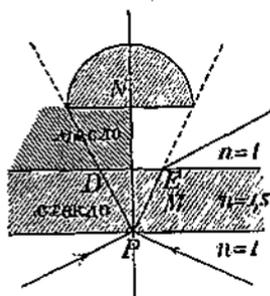


фиг. 145.

толщинѣ покровныхъ стеколъ, можетъ до нѣкоторой степени сглаживаться тѣмъ, что при слишкомъ толстыхъ покровныхъ стеклахъ (0,25 — 0,30 мм.) трубку *M* (фиг. 138) нѣсколько вдвигаютъ, а при слишкомъ тонкихъ (0,10 — 0,12 мм.) — выдвигаютъ, иными словами, означенный недостатокъ стараются уменьшить измѣненіемъ разстоянія между объективомъ и окуляромъ. Для уменьшенія того же недостатка примѣняютъ иногда коррекціонное кольцо, о которомъ упоминалось въ § 49 (фиг. 86.).

Предположимъ теперь, что между покровнымъ стекломъ и объективомъ не воздухъ, а такая жидкость, которой показателъ прелом. одинаковъ съ показателемъ преломленія стекла, изъ котораго приготовлены покровное стекло и нижняя линза объектива, т. е. предположимъ, что мы имѣемъ дѣло съ *однородною иммерсією* § 72. Для уясненія такого случая обратимся къ чертежу (фиг. 146). На немъ буквою *P* обозначенъ крошечный предметъ, прижатый къ покровному

стеклу, M — покровное стекло съ показ. преломленія $n = 1,5$, N — нижняя линза объектива, показател преломленія которой также $n = 1,5$. Между объективомъ и покровнымъ стекломъ находится жидкость съ показателемъ прел. $n = 1,5$ (кедровое масло). Чтобы лучше видѣть значеніе присутствія означенной жидкости, на чертежѣ только лѣвая часть пространства между объективомъ и покровнымъ стекломъ



фиг. 146.

представлена занято иммерсионною жидкостью, а остальная часть (правая) предполагается занято воздухомъ. Очевидно непосредственно изъ чертежа, что лучъ PD , идущій отъ предмета P , достигаетъ линза N объектива, не преломляясь, такъ какъ онъ идетъ черезъ средину съ одинаковымъ показат. преломленія $n = 1,5$. Тогда какъ лучъ PE , вышедшій изъ P подъ тѣмъ же, какъ и лучъ PD , наклоненіемъ къ оси PN , входя въ воздухъ, котораго показател

преломленія 1, отклоняется въ сторону, совсѣмъ не попадая въ объективъ. Отсюда не трудно сообразить, что вообще, благодаря присутствію жидкости съ показат. прел. $n > 1$, въ объективъ попадаетъ гораздо больше лучей, чѣмъ въ случаѣ отсутствія ея. Если на ряду съ только что сказаннымъ вспомнимъ сказанное раньше по поводу иммерсионной системы, то намъ станетъ понятно все преимущество такой системы передъ сухою.

Очевидно, что при вычисленіи объектива, предназначеннаго для однородной иммерсии, вѣтъ надобности дѣлать поправку на покровное стекло. Если предметъ находится въ слобѣ канадскаго бальзама, что часто случается на самомъ дѣлѣ, то онъ (предметъ) даже можетъ и не прилегать къ самому покровному стеклу и явленіе не измѣнитъ своего характера, такъ какъ показател преломленія канадскаго бальзама тоже приблизительно 1,5.

Если еще между конденсаторомъ и предметнымъ стекломъ помѣстить кедровое масло, то лучи освѣщающаго лучка, выйдя изъ конденсатора, дойдутъ до предмета, не измѣняя своего направленія и не отражаясь отъ предметнаго стекла, а слѣдовательно почти не ослабляясь. Но, конечно, въ такомъ случаѣ предметное стекло и по крайней мѣрѣ верхняя линза конденсатора должны быть тоже изъ стекла съ показат. преломленія 1,5 или вообще съ показателемъ преломл., равнымъ показателю преломленія жидкости.

Что касается яркости изображенія, наблюдаемаго въ микроскопѣ, то объ этомъ говорилось въ § 70.

Объ окулярахъ будемъ подробно говорить въ статьѣ о телескопѣ, а теперь еще скажемъ объ опредѣленіи нѣкоторыхъ постоянныхъ и объ испытаніи микроскопа.

Опредѣленіе оптическихъ постоянныхъ микроскопа.

§ 77. **Опредѣленіе фокусовъ и фокусныхъ разстояній объектива и окуляра.** Сначала объяснимъ, какъ опредѣляется положеніе второго (верхняго) фокуса объектива. Устранивъ въ микроскопѣ револьверъ *B* (фиг. 138), привинчиваютъ къ нижнему концу внутренней трубки *M* слабый объективъ, а въ верхній конецъ ея вставляютъ окуляръ и полученный такимъ образомъ *вспомогательный микроскопъ* передвиженіемъ трубки *M* наводятъ на нижній край наружной трубки *N*. Это дѣлается такъ. Берутъ запыленное стекло, приставляютъ его запыленною стороною къ нижнему краю наружной трубки *N* и двигаютъ въ ней трубку *M* то вверхъ — то внизъ, пока смотрящему въ окуляръ трубки *M* не покажется отчетливо запыленная поверхность упомянутого стекла. Въ этотъ моментъ микроскопъ установленъ на нижній край трубки *N*. Это будетъ первая установка вспомогательнаго микроскопа *M* и ее отмѣчаютъ на трубкѣ *M* по тѣмъ дѣленіямъ, которыя на ней нанесены, а если таковыхъ нѣтъ, то дѣлаютъ на поверхности трубки *M* наравнѣ съ верхнимъ краемъ трубки *N* легкой значекъ. Затѣмъ, къ нижнему концу наружной трубки *N* привинчиваютъ испытуемый объективъ и двигаютъ внутреннюю трубку *M* до тѣхъ поръ, пока смотрящему въ окуляръ ея не покажется отчетливое изображеніе отдаленнаго предмета, напр. рамы окна, находящагося на разстояніи 2-хъ или 3-хъ метровъ отъ микроскопа. При чемъ необходимо замѣтить, что при этой работѣ конденсаторъ долженъ быть устраненъ и лучи, идущіе отъ отдаленнаго предмета должны направляться въ микроскопѣ *плоскимъ* зеркаломъ или же можно самъ микроскопъ направить на окно, пагубая его надлежащимъ образомъ вращеніемъ около осп *U*. Такъ какъ изображеніе весьма отдаленнаго предмета получается въ фокусной плоскости системы, то послѣдняя установка микроскопа *M* есть ничто иное, какъ установка его на фокусную плоскость испытуемаго объектива. Замѣтивъ, на сколько и въ какую сторону пришлось передвинуть трубку *M* отъ первой установки до послѣдней, легко опредѣлить, на сколько ниже или выше нижняго края трубки *N* находится (вторая) фокусная плоскость испытуемаго объектива.

Теперь нетрудно опредѣлить и численную величину второго фокуснаго разстоянія объектива. Для этой цѣли воспользуемся формулою § 18.

$$\frac{y'}{y} = \frac{x'}{F'} \dots \dots \dots (40)$$

Такъ какъ на практикѣ имѣются въ виду лишь абсолютныя численныя значенія величинъ, то мы введемъ слѣдующія обозначенія:

абс. вел. $\frac{y'}{y} = N$. . . увеличеніе системы,

абс. вел. $x' = L$. . . разстояніе изображенія отъ второго фокуса системы,

абс. вел. $F'' = f$. . . размѣры второго фокуснаго разстоянія системы.

Тогда на основаніи формулы (40) напишемъ:

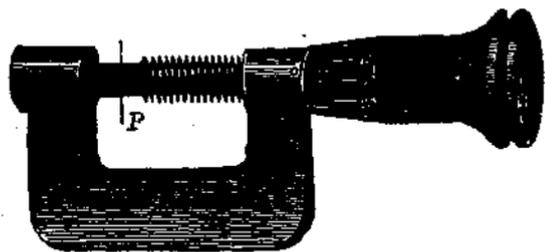
$$N = \frac{L}{f} \dots \dots \dots (I)$$

По этой формулѣ находимъ f , если извѣстно L и N . Въ свою очередь L и N находятся слѣдующимъ образомъ. Устранивъ въ трубкѣ M (фиг. 138) окуляръ и объективъ, прищипываютъ обычнымъ путемъ испытуемый объективъ къ нижнему краю наружной трубки N , кладутъ на верхній край трубки M промасленную бумагу, на которой начерченъ масштабъ съ дѣленіями, и на этой бумагѣ посредствомъ вдвиганія и выдвиганія трубки M получаютъ дѣйствительное изображеніе, даваемое испытуемымъ объективомъ отъ такого же масштаба, помѣщеннаго подъ объективомъ. Тогда легко можно опредѣлить увеличеніе N , производимое въ данномъ случаѣ испытуемымъ объективомъ. Если, напр. случится, что 20 дѣл. масштаба на бумагѣ, лежащей на верхнемъ краѣ трубки M , покроеся однимъ дѣленіемъ изображенія масштаба, то увеличеніе $N=20$. Замѣтивъ разстояніе l между верхнимъ краемъ внутренней трубки M и нижнимъ краемъ наружной трубки N , легко опредѣлить и L , если уже найдено по способу, описанному въ началѣ этого параграфа, разстояніе второй фокусной плоскости испытуемаго объектива отъ нижняго края наружной трубки N , при чемъ послѣднее разстояніе нужно прибавить къ разстоянію l или вычесть изъ него, смотря по тому, будетъ ли вторая фокусная плоскость испытуемаго объектива ниже или выше нижняго края трубки N . Въ результатѣ получится L .

Слѣдуетъ помнить, что здѣсь N переменная величина и зависитъ отъ мѣста предмета. Предметъ или промасленная бумага съ начерченнымъ тушью на ней масштабомъ наклеивается обыкновенно на цилиндрическую діафрагму, о которой мы уже говорили и которая можетъ подъ предметнымъ столикомъ двигаться вверхъ и внизъ, что способствуетъ болѣе легкому наведенію дѣйствительнаго изображенія масштаба на бумагу, покрывающую верхній край трубки M .

Если испытуемый объективъ представляетъ очень сильную систему, то вмѣсто упомянутаго масштаба на бумагѣ подь объективомъ помѣщается стеклянная пластинка съ весьма мелкими дѣлениями (напр. въ 0,01 мм.), а бумажка съ дѣлениями на верхнемъ краѣ трубки *M*, замѣняется микрометрическимъ окуляромъ Рамсдена, причемъ всегда можно опредѣлить разстояніе микрометрической пластинки съ дѣлениями, находящейся въ окулярѣ Рамсдена, отъ нижняго края трубки *N* и этимъ опредѣлить λ .

Когда мнѣ приходилось опредѣлять увеличеніе *N*, я поступалъ слѣдующимъ образомъ. Масштабъ, подькладываемый подь объективомъ, я замѣнялъ тонкою проволокою (0,1 мм.), которая клалась подь объективомъ на стеклышкѣ. Отъ этой проволоки на промасленной бумагѣ, расположенной на верхнемъ краѣ трубки *M*, получалось отчетливое изображение, котораго ширину можно было довольно точно опредѣлять.



фиг. А.

Зная толщину проволоки и ширину ея изображения, легко можно было вычислить *N*. Этотъ способъ тѣмъ хорошъ, что толщина проволоки можетъ быть аккуратно измѣрена при помощи калибраметра (фиг. А), а во вторыхъ, изображение отъ этой проволоки на промасленной бумагѣ, помѣщаемой на верхнемъ краѣ трубки *M*, выходитъ очень отчетливо и слѣдовательно тоже можетъ быть успешно измѣрено.

Для опредѣленія положенія перваго фокуса объектива находятъ разстояніе этого фокуса отъ ближайшей поверхности объектива. При этомъ можно поступать такъ. кладутъ испытуемый объективъ на столѣкъ микроскопа въ положеніи обратномъ нормальному, т. е. предметною линзою вверхъ. Затѣмъ, какъ и раньше, къ нижнему краю трубки *M* привинчиваютъ объективъ средней силы, а въ верхній конецъ кладутъ окуляръ и составленный такимъ образомъ микроскопъ устанавливаютъ на верхнюю поверхность испытуемаго объектива. Для облегченія этого дѣла можно положить на верхнюю поверхность испытуемаго объектива кусочекъ волоска или бросить какую нибудь пылинку и затѣмъ слѣдуетъ устанавливать вспомогательный микроскопъ *M* до тѣхъ поръ, пока наблюдателю, смотрящему въ окуляръ микроскопа *M*, не покажется отчетливое изображение волоска или пылинки. Это будетъ первая установка. Потомъ выдвигая трубку *M*, устанавливаютъ вспомогательный микроскопъ на изображение весьма

отдаленнаго предмета, даваемое испытываемымъ объективомъ. Во время послѣдней установки трубка N должна оставаться неподвижною. Разница между послѣднею установкою и первою, выраженная въ дѣленіяхъ трубки M , покажетъ разстояніе перваго фокуса отъ первой поверхности предметной линзы объектива. Это разстояніе иногда полезно знать, чтобы судить, какъ далеко отъ объектива находится наблюдаемый препаратъ.

Обозначая первое фокусное разстояніе объектива черезъ F , а второе черезъ F' , мы скажемъ, что

$$F = -F' = f,$$

если система сухая. Въ случаѣ же иммерсіонной системы первое фокусное разстояніе опредѣляется по формулѣ:

$$\frac{F}{F''} = -\frac{n}{n'}, \dots \dots \dots (43)$$

откуда

$$F = -\frac{n}{n'} F' = \frac{n}{n'} f = n f,$$

такъ какъ для микроскопа всегда $n' = 1$.

Нахожденіе же f описано нами въ началѣ этого параграфа.

Подобно тому, какъ опредѣляется положеніе перваго фокуса объектива, можно опредѣлять положеніе фокусовъ и окуляра. При этомъ, если мы поведемъ дѣло такимъ образомъ, что послѣ того какъ окуляръ поставленъ на столикъ микроскопа, мы шпичій край трубки N доведемъ до прикосновенія съ верхнимъ краемъ окуляра, то нетрудно будетъ опредѣлить положеніе фокуса окуляра по отношенію къ нижнему краю трубки N , предполагая, что вспомогательный микроскопъ M предварительно былъ установленъ на этотъ край, и замѣчено было соответствующее дѣленіе на поверхности трубки M . Потомъ, зная положеніе фокуса окуляра по отношенію къ нижнему краю трубки N , нетрудно уже опредѣлить и само фокусное разстояніе окуляра, пользуясь формулою (I) — § 77 и держась такого же способа, какой мы описывали въ началѣ этого параграфа по поводу нахождения втораго фокуснаго разстоянія объектива.

§ 78. Увеличеніе микроскопа. Въ § 68, разсматривая увеличеніе линзы, мы вывели заключеніе, что увеличеніе для сложнаго микроскопа можетъ быть выражено такою формулою:

$$N = \frac{d}{f},$$

гдѣ d разстояніе наилучшаго зрѣнія (видѣнія), а f абсолют. величина втораго фокуснаго разстоянія всего микроскопа.

Но мы имѣли формулу § 24:

$$F'' = \frac{F'_1 \cdot F'_2}{\Delta} \dots \dots \dots (50)$$

Примѣняя эту формулу къ сложному микроскопу, состоящему изъ двухъ системъ (объективъ S_1 + окуляръ S_2) и имѣя въ виду лишь абсолютныя величины, мы введемъ слѣдующия обозначенія:

абс. вел. $F'_1 = f_1 =$ абс. вел. втораго фокусн. расстоянія объектива,

абс. вел. $F'_2 = f_2 =$ " " " " " окуляра,

абс. вел. $F'' = f =$ " " " " " всего микроскопа,

абс. вел. $\Delta = l =$ *редуцированной длины* микроскопа, подъ которою понимается расстояние между вторымъ фокусомъ объектива и первымъ фокусомъ окуляра.

Тогда на основаніи формулы (50) получимъ:

$$f = \frac{f_1 \cdot f_2}{l}$$

и слѣдовательно

$$N = \frac{d \cdot l}{f_1 \cdot f_2} \dots \dots \dots (104).$$

Примѣчаніе. Последнюю формулу можно вывести и инымъ путемъ. Для этого обратимся къ чертежу (фиг. 147), изображающему ходъ лучей въ сложномъ микроскопѣ, при чемъ объективъ и окуляръ микроскопа для упрощенія разсужденій представлены въ видѣ простыхъ линзъ S_1 и S_2 .

На основаніи чертежа (фиг. 147) имѣемъ

$$N = \frac{A_2 B_2}{\Delta B}$$

или

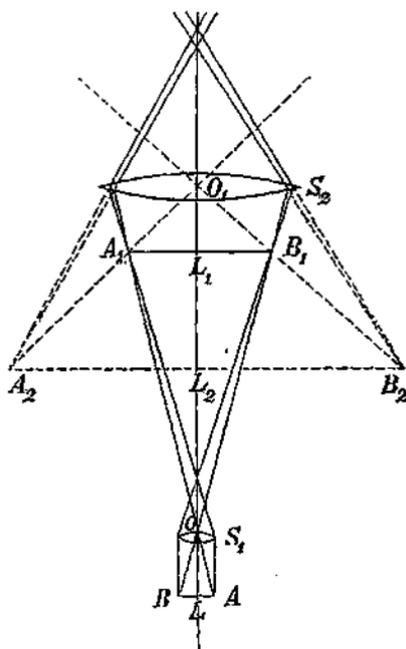
$$N = \frac{A_1 B_1}{AB} \cdot \frac{A_2 B_2}{B_1 A_1}$$

Но изъ подобія треугольниковъ ABO и $A_1 B_1 O$ имѣемъ:

$$\frac{A_1 B_1}{AB} = \frac{OL_1}{OL},$$

а изъ подобія треугольниковъ $O_1 A_2 B_2$ и $O_1 A_1 B_1$ имѣемъ:

$$\frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} = \frac{L_2 O_1}{L_1 O_1}.$$



фиг. 147.

Принимая во внимание, что для линзъ въ воздухѣ первое и второе фокусныя разстоянія *по абсолютной величинѣ* равны другъ другу, мы безъ ощутительной погрѣшности можемъ принять:

$$O_1L_1 = f_2, O_1L_2 = d, L_1O = l \text{ и } OL = f_1; \text{ тогда}$$

последнія двѣ пропорціи перепишутся такъ:

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{l}{f_1} \text{ и } \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{d}{f_2};$$

поэтому

$$N = \frac{d \cdot l}{f_1 \cdot f_2},$$

что идентично съ формулою (104).

Последнія разсужденія не годятся въ случаѣ камерціонной системы, такъ какъ тогда для объектива первое фокусное разстояніе не равняется второму даже по абсолютной величинѣ.

Во всякомъ случаѣ формула

$$N = \frac{A_1B_1}{AB} \cdot \frac{A_2B_2}{A_1B_1}$$

показываетъ, что увеличеніе микроскопа равняется увеличенію его объектива, умноженному на увеличеніе окуляра, при чемъ

$$\text{увеличеніе объектива } N_1 = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{l}{f_1} \dots \S 77\text{---(I)}$$

$$\text{и увеличеніе окуляра } N_2 = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{d}{f_2} \dots \S 68\text{---(95)}$$

Но оптики формулу (104) представляютъ себѣ такъ:

$$N = \frac{d}{f_1} \cdot \frac{l}{f_2}$$

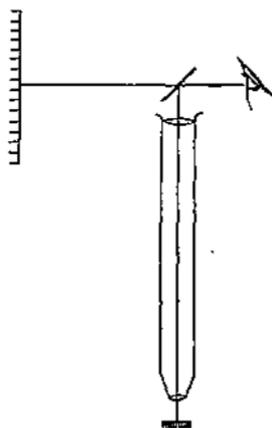
при этомъ подѣ $\frac{d}{f_1}$ понимаютъ собственное увеличеніе объектива и даже по этой формулѣ $\frac{d}{f_1}$ бываютъ вычислены собственные увеличенія объективовъ, помещаемыя въ преискураптахъ. Множитель же $\frac{l}{f_2}$ относится къ окуляру и называется по Аббѣ *силою окуляра*.

Формула (104) даетъ возможность опредѣлить увеличеніе сложнаго микроскопа, если только извѣстны: редуцированная длина трубы микроскопа l , а также значенія f_1 и f_2 . Значеніе же d , т. е. разстояніе наилучшаго видѣнія, принимаемъ равнымъ 250 mm. Какъ

найти f_1 и f_2 , объ этомъ говорилось въ предыдущемъ параграфѣ; а значеніе l всегда можно опредѣлить, зная положеніе фокусовъ объектива и окуляра. Замѣтимъ, что при вычисленіи увеличенія сложнаго микроскопа пѣтъ основанія топяться за большую точностью: достаточно опредѣлить увеличеніе въ цѣлыхъ числахъ, при чемъ понятно, что всѣ величины f_1 , и f_2 , d и l надо выражать въ однѣхъ и тѣхъ же мѣрахъ, напр. въ миллиметрахъ. Упомянемъ еще о чисто эмпирическомъ способѣ нахождения увеличенія сложнаго микроскопа.

Помѣщаютъ подъ объективомъ микроскопа стеклянный микрометръ, т. е. стеклянную пластинку, на которой нанесены весьма мелкія дѣленія опредѣленной величины, напр. 100 дѣленій на 1 мм. Затѣмъ однимъ глазомъ разсматриваютъ этотъ микрометръ черезъ микроскопъ, тогда-какъ другимъ невооруженнымъ глазомъ смотрятъ на опредѣленный масштабъ, расположенный на расстояніи наилучшаго зрѣнія, и замѣчаютъ, сколько дѣленій микрометра со сколькоми дѣленіями масштаба совпадаютъ. Замѣтивъ это, легко опредѣлить увеличеніе микроскопа. Напр. если одно дѣленіе микрометра, равное $\frac{1}{100}$ мм., кажется совпадающимъ съ 1 дѣленіемъ масштаба, равнымъ 1 мм., то очевидно увеличеніе = 100, пбо благодаря микроскопу, $\frac{1}{100}$ мм. возросла до 1 мм.

Есть разныя приспособленія (какъ напр. рисовальный приборъ), облегчающія наблюденія и дѣлающія ихъ болѣе точными. Но это уже подробности. Скажемъ только, что при опредѣленіи увеличенія микроскопа эмпирич. путемъ можно значительно улучшить дѣло, помѣщая надъ окуляромъ микроскопа маленькое зеркальцо, наклонивъ его къ оси микроскопа подъ угломъ въ 45° . Тогда въ этомъ зеркальцѣ будетъ видно по горизонтальному направленію изображеніе микрометра. Помѣстивъ передъ глазами за зеркальцемъ на расстояніи наилучшаго зрѣнія масштабъ, мы можемъ достигнуть того, что упомянутое изображеніе наляжетъ на масштабъ и намъ легче будетъ сравнить дѣленія (фиг. 148).



фиг- 148.

§ 79. **Опредѣленіе численной апертуры.** Численную апертуру можно опредѣлить, пользуясь выведенною въ § 67 формулою

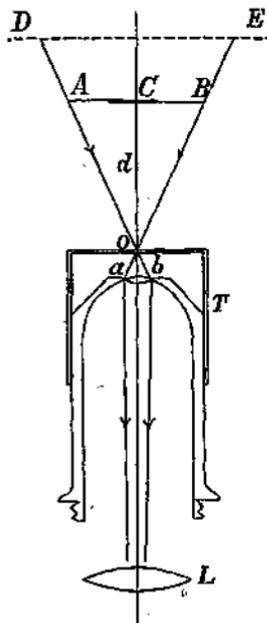
$$a = \frac{R'}{f'}$$

гдѣ a обозначаетъ апертуру, f' — величину второго фокуса. разстоянія объектива, R' — радиусъ свѣтлаго кружка, который получается на промасленной бумагѣ (съ дѣлениями) надъ объективомъ менѣе болѣе во второй фокусной плоскости его при полномъ освѣщеніи, когда свѣтовой конусъ вполнѣ выполняетъ угловое отверстіе объектива. Размѣры этого кружка можно опредѣлить при помощи вспомогательнаго микроскопа M (§ 77).

Есть и другіе способы опредѣленія апертуры. Въ § 67 была выведена формула:

$$a = n \sin U.$$

По этой формулѣ, зная показателя преломленія n той среды, въ которой находится предметъ и уголъ U , который есть ничто иное, какъ половина углового отверстія объектива, можно вычислить нум. апертуру a . Для опредѣленія углового отверстія объектива я пользовался слѣдующимъ способомъ, придуманнымъ мною. На испытуемый объективъ надѣвается бумажная трубка T (фиг. 149) съ непрозрачнымъ бумажнымъ дномъ. Въ *серединѣ* дна уколомъ накаленной



фиг. 149.

иголки дѣлается маленькое отверстіе O , которое перемѣщеніемъ трубки T располагается на такомъ разстояніи отъ объектива, на какомъ обыкновенно располагаются предметы во время разсматриванія ихъ черезъ микроскопъ. Чтобы достигнуть такого расположенія отверстія O , поступаемъ такъ. Привинчиваемъ обыкновеннымъ путемъ испытуемый объективъ къ нижнему краю наружной трубки N микроскопа (фиг. 138) и выдвигаемъ внутреннюю трубку M съ окуляромъ на столько, на сколько она обыкновенно выдвигается во время наблюденій. Затѣмъ, приставивъ глазъ къ окуляру, передвигаемъ трубку T до тѣхъ поръ, пока не получится отчетливое изображеніе отверстія O , сдѣланнаго въ днѣ трубки T . Чтобы точнѣе удалось произвести установку трубки T , надо ее вращать винтообразно по поверхности оправы объектива. Установивъ трубку T , отмѣчаемъ ее

положеніе, отвинчиваемъ объективъ и располагаемъ его менѣе болѣе такъ, чтобы оптическая его ось шла горизонтально по направленію къ обширному источнику свѣта DE , при чемъ трубка T должна занимать надлежащее мѣсто на оправѣ объектива. Затѣмъ, въ опредѣ-

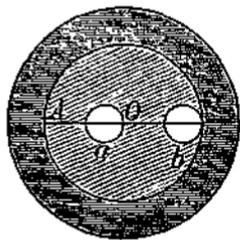
ленномъ разстояніи d отъ отверстія O перпендикулярно къ оси объектива располагаются двѣ непрозрачныя пластинки A и B , заходящія одна за другую, какъ показано на чертежѣ (фиг. 149). Если пластинки A и B сильно раздвинуть (B влѣво, а A вправо) то ни одинъ лучъ не попадетъ въ объективъ черезъ отверстіе O отъ источника свѣта DE . Но если понемногу сдвигать пластинки (двигая пластинку A вправо, а B влѣво), то достигается такое ихъ положеніе, когда лучи уже начнутъ проникать въ объективъ ab , идя отъ источника DE черезъ отверстіе O , что можно легко замѣтить, если смотрѣть въ объективъ черезъ слабую лупу L . Фокусное разстояніе лупы должно быть равнымъ примѣрно 4 сантим. Предположимъ, что на чертежѣ (фиг. 149) изображенъ именно такой первый моментъ, когда справа и слѣва непрозрачной ширмы AB уже начинаетъ проникать свѣтъ въ объективъ. Измѣривъ ширину ширмы AB и зная разстояніе $CO = d$, легко найти или черченіемъ, или вычисленіемъ уголъ AOB , который и представить искомое угловое отверстіе объектива. Источникомъ свѣта DE можетъ служить обширный сильно освѣщенный бѣлый экранъ.

Я потомъ измѣнилъ этотъ способъ, замѣнивъ двѣ пластинки A и B одною — опредѣленной ширины. Въ такомъ случаѣ приходилось измѣнять разстояніе OC непрозрачной ширмы (пластинки), а не ширину ея. Второй способъ удобнѣе именно тѣмъ, что, пользуясь имъ, одною рукою можно держать лупу, а другою передвигать упомянутую пластинку. Надо только аккуратно наблюдать, чтобы пластинка располагалась всякій разъ симметрично по отношенію къ оси объектива и менѣе-болѣе перпендикулярно къ ней. Что касается объектива, то его самое лучшее закрѣпить въ особомъ держателѣ. Можно производить наблюденія и днемъ, пользуясь яснымъ открытымъ небомъ, какъ обширнымъ источникомъ свѣта.

По этому способу было найдено, что въ случаѣ объектива № 6 г. Лейтца пластинку въ 40 мм. нужно приблизить къ отверстію O на разстояніе 14 мм., чтобы свѣтъ уже не попадалъ въ этотъ объективъ, откуда вытекаетъ, что угловое отверстіе означеннаго объектива около 110° .

§ 80. Испытаніе микроскопа въ отношеніи коррекціи. Испытывая разныя діафрагмы и на разныхъ высотахъ (§ 75), выбираютъ ту, которой отверстіе какъ разъ совершенно заполняетъ все поле зрѣнія испытываемаго объектива. Затѣмъ, заклеиваютъ это отверстіе черною бумагою, въ которой дѣлаются два круглыхъ отверстія a и b (фиг. 150) причѣмъ такъ, какъ показано на чертежѣ, гдѣ радіусъ каждаго круга a и b равняется $\frac{1}{2}$ радіуса AO отверстія діафрагмы, кромѣ того окружность одного круга (именно b) касается края отверстія

диафрагмы, а другого — проходит через центр O диафрагмы. Помѣстивъ эту диафрагму съ двойнымъ отверстіемъ въ обычномъ мѣстѣ и на надлежащей высотѣ подѣ столикомъ микроскопа, мы заставляемъ дѣйствовать на испытуемый объективъ два коническихъ пучка свѣта, лучи которыхъ представляютъ всевозможныя наклоненія. При этомъ одинъ изъ этихъ пучковъ (именно a) содержитъ менѣе-болѣе центральные лучи, а другой (именно b) — крайніе.



фиг. 150.

Если теперь помѣстимъ подѣ объективомъ на столикѣ подходящій предметъ, напр. пробную пластинку $Аббэ$ или латунку на предметномъ стеклѣ, то соотвѣтственно этимъ двумъ пучкамъ вообще мы будемъ видѣть въ микроскопѣ два

изображенія, которыя при надлежащей установкѣ можно привести въ совпаденіе. Если бы система была хорошо коррегирована (исправлена), то эти два изображенія при надлежащей установкѣ совпадали бы на всемъ своемъ протяженіи и во всѣхъ цвѣтахъ въ одно общее безцвѣтное и рѣзкое изображеніе. Но въ сильныхъ системахъ трудно достигнуть такого совершеннаго совпаденія. Въ сильныхъ системахъ достаточно, если хоть часть изображенія, главнымъ образомъ располагающаяся въ серединѣ поля зрѣнія, можетъ представиться отчетливо. Во всякомъ случаѣ описаннымъ путемъ мы можемъ рѣшить, которая изъ системъ лучше въ отношеніи коррекціи. Сильныя системы, въ особенности апохроматы, вызываютъ сильное искривленіе поверхности изображенія. Эта поверхность является менѣе-болѣе сферической. Искривленіе объясняется громаднымъ угловымъ отверстіемъ сильныхъ системъ. Вслѣдствіе искривленія поверхности изображенія приходится дѣлать иную установку для совпаденія упомянутыхъ изображеній въ серединѣ поля зрѣнія и иную для совпаденія ихъ на краяхъ послѣдняго. Для сильныхъ системъ это не считается недостаткомъ, потому что онѣ предназначаются для разсматриванія подробностей структуры предмета, который всегда можно передвигать разными частями въ то мѣсто поля зрѣнія, которое рѣзче всегда видно въ микроскопѣ. Но для слабыхъ системъ искривленіе поверхности изображенія считается недостаткомъ въ особенности, когда эти системы предназначены для измѣреній и для одновременнаго осматриванія всего поля зрѣнія.

Если при самой выгодной установкѣ въ присутствіи означенной диафрагмы съ двумя отверстіями никакая часть изображенія не можетъ дать рѣзкаго изображенія, то это указываетъ на присутствіе сферич. aberrации. Появленіе желтыхъ или синихъ каймъ свидѣтельствуетъ о присутствіи хроматической aberrации.

Испытаніе иногда производятъ такъ. На черной матовой пластинкѣ помѣщаютъ крошечные едва замѣтные для глаза шарики ртути и рассматриваютъ ихъ черезъ микроскопъ у окна. При подходящемъ положеніи микроскопа относительно окна можно черезъ микроскопъ видѣть изображение окна, получающееся черезъ отраженіе свѣта отъ шарика ртути, какъ выпуклаго зеркала. Если это изображение не окрашено, то система свободна отъ хроматической аберраціи. Если очертанія изображенія отчетливы и при незначительномъ передвиженіи трубы микроскопа въ ту или другую сторону отчетливость изображенія одинаково скоро исчезаетъ, то и сферическую аберрацію можно считать устраненною. Но для сильныхъ системъ этотъ способъ непригоденъ.

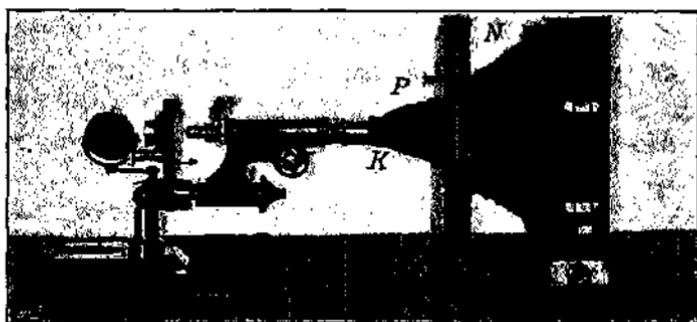
§ 81. **Испытаніе микроскопа относительно его воспроизводительной способности.** Подъ воспроизводительною способностью микроскопа понимается его способность открывать детали (подробности) предмета. Эта способность зависитъ, какъ мы видѣли въ § 72, отъ апертуры объектива, потомъ также отъ рода освѣщенія § 72 и наконецъ, (само собою разумѣется) отъ степени коррекціи объектива. Для испытанія этой способности употребляются искусственные предметы (пластинки Ноберта) и естественные пробныя предметы, какъ напр. чешуя крыльевъ бабочекъ или діатомей. Діатомей можно находить въ прудахъ. Чѣмъ выше воспроизводительная способность микроскопа, тѣмъ больше подробностей (черточекъ) можно замѣтить въ означенныхъ пробныхъ предметахъ. Въ то время какъ при одномъ объективѣ въ микроскопѣ видны лишь продольныя полоски, при другомъ — могутъ быть замѣтны не только продольныя, но и поперечныя болѣе мелкія полоски. Есть въ продажѣ очень удобныя для сравненія воспроизводительной способности разныхъ объективовъ пробныя пластинки, на которыхъ діатомей удивительно искусно расположены въ рядъ по степени тонкости ихъ структуры.

Надо еще замѣтить, что при расчлененіи подробностей предметовъ съ весьма мелкою структурою, какъ напр. *Suirella gemma* или *Amphipleura pellucida*, не безразлично, въ какомъ направленіи располагаются полоски по отношенію къ лучамъ; поэтому полезно препаратъ поворачивать подъ объективомъ, чтобы привести его въ самое выгодное для рассматриванія положеніе. Для этой цѣли хороши столики, способные вращаться.

§ 82. **Испытаніе микроскопа въ отношеніи ортоскопичности.** Это испытаніе можно производить подобно тому, какъ и для фотографическихъ объективовъ при помощи системы линій § 64; но только линіи проводятся не на экранѣ, а на предметномъ стеклѣ. Онѣ должны быть достаточно длинными, параллельными и разстояніе

между ними должно быть очень малое. При разсматриваніи означенныхъ линій черезъ микроскопъ не должно замѣчаться искривленія ихъ. Часто въѣсто системы парал. линій берутъ систему квадратовъ, причемъ изображеніе отъ этихъ квадратовъ тоже должно представляться въ видѣ правильныхъ квадратовъ, если система ортоскопическая.

§ 83. **Микрофотографія.** При надлежащей усталовкѣ микроскопъ можетъ дать дѣйствительное изображеніе, располагающееся надъ окуляромъ; поэтому является возможность получать фотографическіе снимки съ микроскопическихъ изображеній. Этотъ процессъ называется микрофотографіей. Для микрофотографіи существуютъ особыя и дорогія приспособленія. Имѣя у себя фотографическій аппаратъ, я приспособляю его къ микрофотографіи слѣдующимъ образомъ. Въ камерѣ-обскурѣ металлическое кольцо, предназначенное для завинчиванія фотографическихъ объективовъ, было нѣсколько отдѣлено отъ камеры отвинчиваніемъ трехъ винтовъ, которыми оно закрѣпляется. Затѣмъ подъ это кольцо были пододвинуты края узкаго какъ бы рукава *P* (фиг. 151) изъ тонкаго сукна, и кольцо было опять прижато къ камерѣ-обскурѣ завинчиваніемъ упомянутыхъ винтовъ. Потомъ, трубка микроскопа приводилась въ горизонтальное положеніе (фиг. 151) и весь микроскопъ въ полномъ составѣ придви-



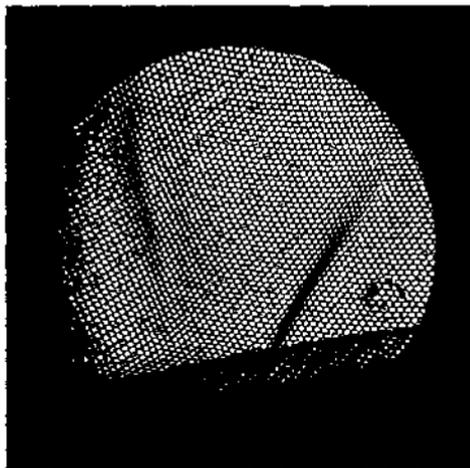
фиг. 151.

гался къ камерѣ-обскурѣ *N*, а затѣмъ рукавъ *P* надѣвался на трубку микроскопа и прижимался къ трубкѣ резиновымъ кольцомъ *K*.

Наводку изображенія на матовое стекло трудно производить. Но можно матовое стекло замѣнить обыкновеннымъ, проведи предварительно на послѣднемъ нѣсколько линій хотя бы чернилами. При такихъ условіяхъ слѣдуетъ, прикрывшись чернымъ сукномъ, смотрѣть при помощи лупы на проведенныя линіи и продолжать установку микроскопа до тѣхъ поръ, пока не покажется отчетливое изображеніе въ томъ-же мѣстѣ, гдѣ означеныя линіи.

Для микрофотографій я готовилъ матовое стекло слѣдующимъ образомъ. Чистое стекло обливалъ свѣжимъ молокомъ, давалъ ему нѣсколько стечь, затѣмъ клалъ стекло горизонтально и высушивалъ. Молоко послѣ высыхания оставляетъ матовый слѣдъ той или другой густоты, смотря по количеству остающагося на стеклѣ молока. Но и въ этомъ случаѣ полезно провести чернилами нѣсколько линій на матовой поверхности и пользоваться лупою.

Описаннымъ въ этомъ параграфѣ приемомъ я произвелъ фотографическій снимокъ съ оболочки глаза мухи. Этотъ снимокъ изображенъ на рисункѣ (фиг. В). Означенный снимокъ полученъ при помощи моего объектива, о которомъ говорилось на страницахъ 140 — 147. Замѣчательно, что даже волоски, находящіеся на этой оболочкѣ, вышли замѣтными.



фиг. В.

ГЛАВА V.

Телескопъ.

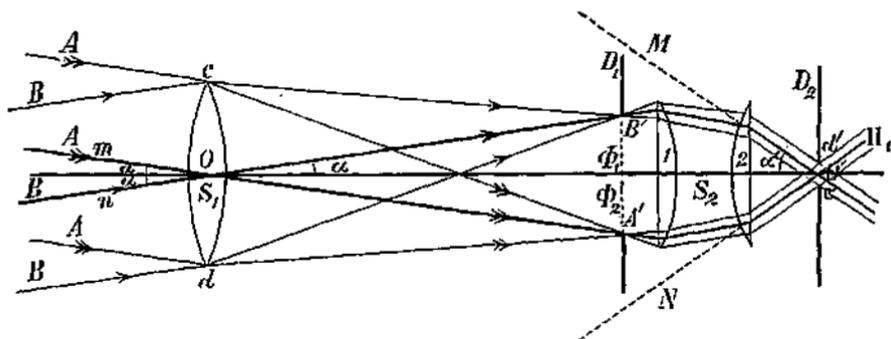
§ 84. **Дѣйствіе телескопа.** Когда мы смотримъ на весьма отдаленный предметъ, напр. на луну или звѣзду, тогда нашъ глазъ является приспособленнымъ къ безконечности или иначе сказать, глазъ тогда является приспособленнымъ видѣть предметъ, посылающій въ него (въ глазъ) параллельные лучи. Если мы, приспособивъ глазъ къ безконечности, станемъ смотрѣть на отдаленный предметъ, напр. на луну, черезъ телескопъ, то луна намъ покажется тоже очень далеко, но подъ бѣльшимъ угломъ, чѣмъ подъ какимъ она видна невооруженному глазу. Благодаря тому обстоятельству, что черезъ телескопъ предметы представляются намъ подъ бѣльшимъ угломъ, мы имѣемъ возможность лучше рассмотреть подробности этихъ предметовъ.

Предметъ представляется намъ подъ бѣльшимъ угломъ и въ томъ случаѣ, если онъ къ намъ приблизится. Слѣдовательно, когда мы наблюдаемъ предметъ черезъ телескопъ, то получается такой же *результатъ* впечатлѣнія, какъ если бы предметъ къ намъ приблизился. Вотъ почему часто говорятъ, что телескопъ приближаетъ. *)

§ 85. **Ходъ и ограниченіе лучей въ телескопѣ.** Телескопъ состоитъ изъ объектива, который изображенъ на чертежѣ (фиг. 152) въ видѣ линзы S_1 , и окуляра, представленнаго на томъ же чертежѣ въ видѣ системы S_2 изъ двухъ линзъ 1 и 2. Въ телескопѣ мы бу-

*) Известенъ фактъ, что если нѣсколько лицъ станутъ по очереди наблюдать черезъ одинъ и тотъ же телескопъ одну и ту же планету, то кажущаяся величина ея для различныхъ лицъ можетъ представиться различною (смот. Русскій Астр. Календарь на 1901 г. стр. 123). Вообще наши зрительныя впечатлѣнія не свободны отъ нѣкоторыхъ возможныхъ иллюзій. Если иногда предметъ черезъ телескопъ не кажется больше, то онъ зато кажется ближе. Чаше всего испытывается такая иллюзія, что черезъ телескопъ предметъ кажется и нѣсколько больше и нѣсколько ближе, чѣмъ безъ телескопа.

демь считать второй фокус Φ_1 объектива S_1 совпадающимъ съ первымъ фокусомъ Φ_2 окуляра S_2 , т. е. мы будемъ смотрѣть на телескопъ, какъ на систему телескопическую, о которой подробно говорилось въ § 25. Если въ телескопѣ на дѣлѣ и не бываетъ строгаго совпаданія означенныхъ фокусовъ, то во всякомъ случаѣ опытъ показываетъ, что эти фокусы находятся весьма близко другъ къ другу.



фиг. 152.

Лучи, идущіе изъ верхней точки A безконечно удаленнаго предмета AB и будучи параллельными, по выходѣ изъ объектива S_1 пересекаются въ некоторой точкѣ A' , лежащей въ фокусной плоскости Φ_2 объектива S_1 (§ 15). Подобно этому лучи, идущіе изъ нижней точки B того же предмета AB , пересекаются въ некоторой точкѣ B' . Такимъ образомъ въ фокусной плоскости объектива получается изображение $A'B'$ весьма отдаленнаго предмета AB . Это изображение лежитъ въ то же время и въ фокусной плоскости окуляра S_2 ; слѣдовательно лучи, пересѣкшись въ точкѣ A' и идя дальше черезъ окуляръ S_2 , выходятъ изъ него параллельно другъ другу въ видѣ пучка Π_1 . Подобныя разсужденія относятся и къ лучамъ, попадающимъ въ окуляръ изъ другихъ точекъ изображения $A'B'$.

Вспоминая сказанное въ § 65, мы видимъ, что въ телескопѣ входнымъ зрачкомъ будетъ кругъ, ограниченный краями объектива S_1 , т. е. отверстіе объектива; а изображение этого отверстія, вызванное окуляромъ S_2 , будетъ выходнымъ зрачкомъ. Положеніе и размеры выходнаго зрачка легко опредѣлить эмпирически. Для этого стоитъ только направить телескопъ на ясную часть неба, установить окуляръ такъ, чтобы точки, замѣчаемыя на небѣ, были резко видны въ телескопъ, а затѣмъ двигать передъ окуляромъ промасленную бумагу то приближая ее къ окуляру — то удаляя отъ него, при чемъ легко можно найти такое положеніе промасленной бумаги, когда на ней является отчетливый свѣтлый кружокъ. Онъ то и будетъ выходнымъ зрачкомъ или рамендовскимъ (окулярнымъ) кругомъ (§ 66).

Выходной зрачек располагается почти въ фокусѣ окуляра, потому что въ телескопѣ разстояніе объектива отъ окуляра сравнительно съ фокуснымъ разстояніемъ послѣдняго значительно. Такъ какъ по отношенію къ окуляру S_2 выходной зрачекъ $e'd'$ служитъ изображеніемъ отверстія ed объектива S_1 , то оптическій центръ O объектива S_1 и центръ O' выходного зрачка $e'd'$ суть точки сопряженныя по отношенію къ тому же окуляру S_2 , а такъ какъ главные лучи, идущіе отъ разныхъ точекъ предмета, проходятъ черезъ оптическій центръ O объектива, то по выходѣ изъ окуляра они должны проходить черезъ центръ O' выходного зрачка $e'd'$. Глазной зрачекъ наблюдателя долженъ по возможности совпадать съ выходнымъ зрачкомъ, чтобы всѣ главные лучи, идущіе отъ предмета и выходящіе изъ окуляра, могли попасть въ глазъ. Но кромѣ того совпаденіе глазного зрачка съ выходнымъ желательнѣе еще и потому, что для выигрыша въ яркости наблюдаемаго изображенія глазъ наблюдателя долженъ воспринимать побольше лучей, выполняющихъ выходной зрачекъ.

Непосредственно изъ чертежа (фиг. 152) видно, что свѣтовой пучекъ edB' , которому соответствуетъ главный лучъ OB' , еще весь проникаетъ черезъ окуляръ и заполняетъ отверстіе выходного зрачка; но всякій такой пучекъ лучей, котораго главный лучъ образуетъ съ осью OO' большій уголъ, чѣмъ какой образуетъ главный лучъ OB' , уже не пройдетъ цѣлкомъ черезъ окуляръ, такъ какъ часть его пойдетъ мимо поверхности линзы 1. Такіе пучки вызывали бы на краяхъ изображенія ослабленіе яркости. Чтобы этого не было, въ плоскости изображенія $A'B'$ помѣщается матеріальная діафрагма D_1 , которая, какъ мы уже знаемъ, называется діафрагмою поля зрѣнія. Очевидно, отверстіе этой діафрагмы должно быть нѣсколько меньше отверстія линзы 1. Въ каждомъ отдѣльномъ случаѣ для опредѣленія максимальной величины отверстія діафрагмы поля зрѣнія можно пользоваться черченіемъ или испытаніемъ діафрагмъ съ разными отверстиями. Во всякомъ случаѣ поле зрѣнія, ограничиваемое этою діафрагмою, должно быть равномерно яркимъ, если предметъ представляется равномерно освѣщеннымъ.

§ 86. Увеличеніе телескопа. Согласно § 68 мы скажемъ, что увеличеніемъ телескопа называется отношеніе угла, подъ которымъ виденъ предметъ черезъ телескопъ, къ углу, подъ которымъ виденъ тотъ же предметъ невооруженному глазу. На чертежѣ (фиг. 152) предполагается, что предметъ виденъ подъ угломъ mOn *) $= \angle B'OA'$,

*) Понятно, что при перемѣщеніи глаза наблюдателя изъ O въ O' величина этого угла не измѣнится замѣтно, такъ какъ предметъ AB очень далеко.

а черезъ телескопъ тотъ же предметъ виденъ подъ угломъ $M'O'N$; следовательно, обозначая увеличеніе телескопа черезъ Y , напишемъ:

$$Y = \frac{\angle M'O'N}{\angle B'O'A'} = \frac{2\alpha'}{2\alpha} = \frac{\alpha'}{\alpha}.$$

Если углы α и α' незначительны, что часто имѣеть мѣсто для телескопа (напр. когда разсматриваются планеты), то можно принять:

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{\text{tg } \alpha'}{\text{tg } \alpha}.$$

Теперь замѣтимъ, что такъ какъ лучи, устремляющіеся въ пространство предмета въ точку O , выходятъ изъ телескопа, направляясь изъ точки O' , то точки O и O' по отношенію ко всей системѣ, какую представляетъ телескопъ, сопряженныя; слѣдовъ для нихъ имѣеть мѣсто равенство:

$$\frac{\text{tg } \alpha'}{\text{tg } \alpha} = \text{абс. вел. } A,$$

гдѣ, какъ и всегда, подъ A понимаемъ *угловое* увеличеніе системы.

Поэтому

$$Y = \text{абс. вел. } A.$$

Но по ур. (57) — § 25 имѣемъ:

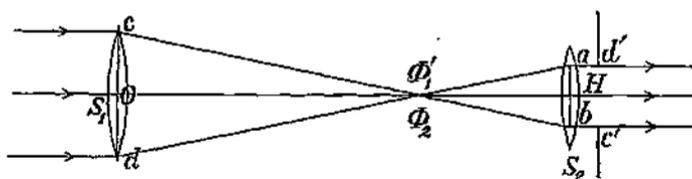
$$A = -\frac{F_1}{F_2},$$

гдѣ F_1 и F_2 соотвѣтственно выражаютъ первыя фокусныя разстоянія объектива и окуляра. Такъ какъ $F_1 > 0$ и $F_2 > 0$, то получаемъ такое равенство:

$$Y = \frac{F_1}{F_2},$$

т. е. *увеличеніе телескопа равно отношенію фокуснаго разстоянія объектива къ фокусному разстоянію окуляра.*

Въ § 25 мы видѣли, что отношеніе діаметровъ двухъ цилиндрическихъ пучковъ лучей, сопряженныхъ по отношенію ко всей те-



фиг. 153.

лескопической системѣ, равно поперечному увеличенію B . Примѣняя это къ телескопу и замѣчая, что цилиндрическому пучку съ попереч-

нымъ сѣченіемъ, равнымъ отверстію объектива cd (фиг. 153) соответствуетъ цилиндрической лучезъ исчерпываемъ сѣченіемъ, равнымъ отверстію выходного зрачка $c'd'$, мы напишемъ:

$$\text{абс. вел. } B = \frac{d}{D},$$

гдѣ d обозначаетъ діаметръ выходного зрачка $c'd'$ (фиг. 153), а D обозначаетъ діаметръ отверстія объектива cd . Ради простоты окуляръ на черт. (фиг. 153) изображенъ въ видѣ одной простой линзы S_2 .

Согласно ур. (57) можемъ написать:

$$A = \frac{1}{B}.$$

Значитъ

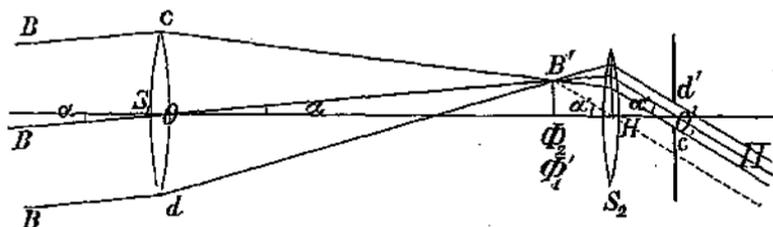
$$\text{абс. вел. } A = \frac{1}{\text{абс. в. } B} = \frac{D}{d};$$

поэтому

$$Y = \frac{D}{d}.$$

т. е. *увеличеніе телескопа равно отношенію діаметра объектива къ діаметру выходного зрачка.*

Необходимо намъ здѣсь замѣтить, что если бы мы на практикѣ пожелали воспользоваться послѣдней формулой для опредѣленія увеличенія телескопа, то при нахожденіи діаметра выходного зрачка, какъ кружка, могущаго получиться на промасленной бумагѣ, слѣдуетъ на всякій случай отвинчивать крышку, которая обыкновенно бываетъ на окулярѣ. Это полезно дѣлать по той простой причинѣ, что сдѣланное для глаза отверстіе въ этой крышкѣ по размѣрамъ иногда



фиг. 154.

не соответствуетъ объективу телескопа и можетъ быть меньше выходного зрачка.

Формулы для опредѣленія увеличенія телескопа можно вывести простымъ путемъ, рассуждая слѣдующимъ образомъ:

Лучи, выходящіе изъ точки B' (фиг. 154), лежащей въ фокусной плоскости окуляра S_2 , по выходѣ изъ него, должны быть параллель-

ными другъ другу и въ то же время къ побочной оси $B'H$ окуляра S_2 , такъ какъ, если бы существовалъ лучъ, идущій изъ B' въ оптическій центръ H линзы S_2 , то при незначительной толщинѣ ея онъ вышелъ бы изъ нея, почти не измѣняя своего направленія (§ 32) и, конечно, параллельно остальнымъ лучамъ Π , образуя съ осью OO' такой же уголъ α' , какой образуетъ главный лучъ пучка Π . Изъ треуг. $B'O\Phi_2$ и $B'H\Phi_2$ по очереди получаемъ:

$$\begin{aligned} B'O\Phi_2 &= O\Phi_2 \operatorname{tg} B'O\Phi_2 \\ B'H\Phi_2 &= H\Phi_2 \operatorname{tg} B'H\Phi_2, \end{aligned}$$

откуда имѣемъ:

$$O\Phi_2 \operatorname{tg} B'O\Phi_2 = H\Phi_2 \operatorname{tg} B'H\Phi_2$$

или

$$F_1 \operatorname{tg} \alpha = F_2 \operatorname{tg} \alpha',$$

откуда находимъ, что

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha},$$

а при малыхъ углахъ α и α' получимъ

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\alpha'}{\alpha} = Y.$$

Далѣе, обращаясь къ чертежу (фиг. 153), мы изъ подобныхъ треугольниковъ $c\Phi_2d$ и $a\Phi_2b$ находимъ, что

$$\frac{cd}{ab} = \frac{O\Phi_2}{H\Phi_2} \quad \text{или} \quad \frac{D}{d} = \frac{F_1}{F_2},$$

потому что $cd = D$ и $ab = c'd' = d$; слѣдов.

$$Y = \frac{D}{d}.$$

Опишемъ еще одинъ эмпирической способъ для опредѣленія увеличенія телескопа. Направляютъ телескопъ на вѣштукатуренную стѣну отдаленнаго каменнаго дома и смотрятъ на нее однимъ глазомъ черезъ телескопъ, а другимъ непосредственно, регулируя при этомъ установку окуляра, такъ, чтобы оба глаза по возможности видѣли одинаково отчетливо стѣну. Тогда можно замѣтить, сколько кирпичей, видимыхъ на стѣнкѣ дома невооруженнымъ глазомъ, прикрывается однимъ кирпичемъ, видимымъ черезъ телескопъ. Найденное число покажетъ приблизительно увеличеніе телескопа. Для такого способа мы имѣемъ то основаніе, что въ данномъ случаѣ, когда мы однимъ глазомъ смотримъ непосредственно на отдаленный предметъ, а другимъ въ то же время — на изображеніе этого предмета, видимое въ телескопѣ, то предметъ и изображеніе его проектируются для насъ въ одной плоскости, на одинаковомъ разстояніи отъ насъ,

и слѣдоват. здѣсь можемъ примѣнить правило, напечатанное курсивнымъ шрифтомъ въ § 68, пунктъ 2. Этотъ способъ можно считать хорошимъ для слабыхъ увеличеній. Въмѣсто нештукатуренной стѣнки можно воспользоваться масштабомъ съ крупными дѣленіями, помѣщая его на значительномъ разстояніи передъ объективомъ телескопа. Находятъ, что максимальное увеличеніе, которое можетъ выдержать хорошей телескопъ безъ значительнаго нарушенія отчетливости въ изображеніи, опредѣляется по расчету „два” на 1 мм. діаметра объектива, т. е. если діаметръ объектива 100 мм., то максимальное увеличеніе 200. Но вообще невыгоднѣйшее увеличеніе опредѣляется непосредственнымъ испытаніемъ.

§ 87. **Поле зрѣнія.** Въ телескопѣ, какъ и въ микроскопѣ, уголъ поля зрѣнія зависитъ между прочимъ отъ діафрагмы поля зрѣнія. Изъ треугольника $B'O\Phi_1$ (фиг. 152) находимъ, что

$$B'\Phi_1 = O\Phi_1 \operatorname{tg} \alpha,$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B'\Phi_1}{O\Phi_1} = \frac{R}{F_1},$$

гдѣ R — радиусъ отверстія діафрагмы, F_1 — фокусное разстояніе объектива и α — половина угла поля зрѣнія. Чѣмъ сила $\left(\frac{1}{F_2}\right)$ окуляра больше, тѣмъ меньше фокусное разстояніе его. Но можно принять, что съ уменьшеніемъ фокуснаго разстоянія окуляра въ известное число разъ, во столько же разъ уменьшаются и размѣры діафрагмы (т. е. R). Значитъ, замѣняя одинъ окуляръ другимъ — болѣе сильнымъ, мы по необходимости уменьшаемъ поле зрѣнія.

§ 88. **Замѣчанія объ ортоскопичности телескопа и яркости изображенія.** Для того, чтобы изображенія, наблюдаемая въ телескопѣ, были подобны предмету, необходимо, чтобы точки O и O' (фиг. 152) были ортоскопическими, т. е. для нихъ должно быть соблюдено условіе (69) — § 37, которое по отношенію къ чертежу (фиг. 152) выразится такъ:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha'}{\operatorname{tg} \alpha} = \operatorname{const.}$$

Ортоскопичность телескопа главнымъ образомъ зависитъ отъ ортоскопичности окуляра — въ особенности, когда для объектива соблюдено условіе синусовъ.

Что касается яркости изображенія, наблюдаемаго въ телескопѣ, то объ этомъ предметѣ говорилось въ § 70.

§ 89. **Труба телескопа,** на одномъ концѣ которой помѣщается объективъ S (фиг. 155), а на другомъ — трубка T съ окуляромъ, со-

держитъ внутри діафрагмы $a, b, c \dots$. Эти діафрагмы обыкновенно располагаются на одинаковыхъ разстоянiяхъ другъ отъ друга и края отверстiй ихъ лежатъ на боковой поверхности конуса, котораго основанiемъ служитъ отверстiе объектива S ; а вершиною — приблизи-



фиг. 155.

тельно главный фокусъ объектива Φ . При этомъ эти діафрагмы, а также и внутреннiя стѣнки самой трубы, должны быть выкрашены матовою черною краскою. Все это дѣлается для устранения нежела- тельнаго вреднаго бокового свѣта, который, отражаясь отъ боковыхъ стѣнокъ трубы, могъ бы попадать въ окуляръ и этимъ ослаблять бы выразительность изображенiя.

§ 90. **Испытанiе телескопа.** Укажемъ прежде всего на нѣко- торыя испытанiя одного только объектива. Наводятъ телескопъ на свѣтящуюся точку. Такою точкою можетъ быть яркая неподвижная звѣзда или изображенiе солнца, получающееся въ слѣдствiе отраженiя непосредственныхъ солнечныхъ лучей отъ маленькаго полнрованнаго чернаго шарика, какъ отъ выпуклаго зеркала. Если бы лучи всѣхъ цвѣтовъ, вышедши отъ свѣтящейся точки и прошедши черезъ объек- тивъ, собирались въ одной точкѣ, то эта точка показалась бы въ те- лескопѣ бѣлою. Для болѣе тщательнаго изслѣдованiя, какiе лучи собираются въ одной точкѣ, какiе нѣтъ, поступаютъ такъ. Передъ сильнымъ окуляромъ помѣщаютъ малую призму. Черезъ эту призму и окуляръ разсматриваютъ ту точку, которая является въ телескопѣ, какъ изображенiе вѣтшней точки, на которую наведенъ телескопъ. Если бы всѣ лучи собирались въ одной точкѣ, то упомянутое изобра- женiе черезъ призму и окуляръ показалось бы въ видѣ разноцвѣтной линiи подобно тому, какъ если бы мы разсматривали неподвижную звѣзду (или вообще свѣтящуюся точку), помѣстивъ передъ своимъ глазомъ призму. Но если лучи не всѣхъ цвѣтовъ собираются въ од- ной точкѣ, то вмѣсто цвѣтной линiи получается цвѣтная полоска съ расширенiями. Если только желтые и синiе лучи сходятся въ од- ной точкѣ, то въ упомянутой полоскѣ въ разныхъ мѣстахъ ея полу- чаются двѣ точки: одна желтая, а другая синяя. Въ остальныхъ же мѣстахъ полоска будетъ представлять расширенiя (фиг. 156).

Чтобы изслѣдовать, на сколько устранена сферическая абerra- цiя по всѣмъ зонамъ объектива, устраняютъ призму и закрываютъ

по очереди сначала крайнія зоны и наблюдаютъ упомянутое изображение точки, а потомъ закрываютъ внутреннія зоны, оставивъ крайнія открытыми, и опять наблюдаютъ то же изображение, при чемъ важно подмѣтить, приходится ли вмѣнять установку сильного окуляра, чтобы рѣзко видѣть изображение, какъ въ случаѣ закрытія крайнихъ, такъ и въ случаѣ закрытія внутреннихъ зонъ.



фиг. 136.

Иногда при разсматриваніи черезъ телескопъ планеты мы замѣчаемъ, что одинъ край ея окрашенъ въ желтый цвѣтъ, тогда какъ противоположный — въ синий. Поворачивая немного объективъ въ плоскости, перпендикулярной къ оси трубы, мы можемъ замѣтить, что мѣста окрашиваній также перемѣщаются. Тогда заключаемъ, что замѣченный недостатокъ кроется въ объективѣ и причина его — это неудовлетворительная центровка кронгласа относительно флинтгласа. Двигая понемногу одно стекло по поверхности другого, можно всегда ихъ такъ расположить относительно другъ друга,

что означенный недостатокъ исчезнетъ. Подобное явленіе окрашиванія въ равныя цвѣта двухъ противоположныхъ краевъ изображенія отъ свѣтлаго предмета можно легко наблюдать, если разсматривать его черезъ несклеенный ахроматическій объективъ, не приводя оба стекла (кронглась и флинтглась) въ концентрическое расположеніе, а нѣсколько сдвинувъ одно относительно другого.

Ортоскопичность телескопа можно провѣрять разсматриваніемъ черезъ него оконной рамы достаточно (по не слишкомъ) отдаленнаго дома. Рама не должна представляться искривленною. Рядъ длинныхъ параллельныхъ линий, располагающихся въ плоскости, перпендикулярной къ оси трубы, долженъ представляться черезъ телескопъ тоже въ видѣ ряда параллельныхъ линий безъ искривленія. Наблюдаемая линія должны быть длинными, чтобы изображение ихъ въ телескопѣ простиралось по всему полю зрѣнія.

Отсутствіе ортоскопичности вообще не представляетъ еще существеннаго недостатка въ телескопѣ. При оцѣнкѣ достоинства телескопа существеннымъ является вопросъ, какова воспроизводительная способность телескопа, т. е. *на сколько онъ позволяетъ различать подробности въ наблюдаемыхъ предметахъ*. Для испытанія воспроизводительной способности телескопа часто избираютъ, какъ предметъ наблюденія, двойныя звѣзды. Двойная звѣзда невооруженному глазу кажется простою, а телескопъ можетъ ее раздѣлить на двѣ. Чѣмъ меньше угловое разстояніе между двумя звѣздами, входящими въ составъ сложной звѣзды, тѣмъ лучше долженъ быть телескопъ, чтобы раздѣлить ихъ. Вообще чѣмъ больше объективъ (а слѣдова-

тельно и телескопъ), тѣмъ легче онъ раздѣляетъ сложныя звѣзды; но это раздѣленіе, конечно, зависитъ еще и отъ того, съ какимъ совершенствомъ изготовлена вся та оптическая система, которую представляетъ телескопъ. Для испытанія воспроизводительной способности телескопа рекомендуютъ слѣдующія звѣзды, смотря по величинѣ діаметра объектива:

Діам. объект.:	Двойн. звѣзды:
50 мм. . . .	γ Дельфина (11"), γ Андромеды (10",3)
80 мм. . . .	Касторъ (5",5), γ Дѣвы (5"), α Геркулеса (4",7)
95 мм. . . .	α Лирь, α Рыбъ (3",1)

Числа въ скобкахъ обозначаютъ угловыя разстоянія между составляющими звѣздами. *)

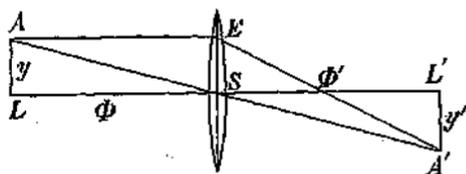
Не надо забывать, что на результатъ наблюденій вліяетъ и состояніе атмосферы.

Если мы желаемъ сравнить два телескопа въ отношеніи ихъ воспроизводительной способности и рѣшить, который лучше, а который хуже, то сравненіе должно производиться при одинаковомъ увеличеніи и одинаковой яркости изображеній въ обоихъ сравниваемыхъ телескопахъ и тотъ изъ нихъ надо признать лучшимъ, который даетъ возможность заглянуть болѣе подробностей въ наблюдаемомъ предметѣ.

Замѣтимъ еще, что въ хорошій телескопъ яркая неподвижная звѣзда кажется яркимъ отчетливымъ пунктомъ, при чемъ изображеніе быстро искажается, если хоть нѣсколько сдвинуть сильный окуляръ съ надлежащей установки.

§ 91. **Окуляры.** Предварительно выведемъ двѣ формулы, которыя въ примѣненіи къ окуляру болѣе удобны, чѣмъ формулы, введенныя раньше.

Пусть на чертежѣ (фиг. 157) S представляетъ весьма тонкую линзу, толщиною которой можно пренебречь. Далѣе, пусть первый фокусъ этой линзы будетъ въ точкѣ Φ , а второй въ точкѣ Φ' . Съ обѣихъ сторонъ линза ограничена воздухомъ. Лучъ AE , идущій изъ точки A параллельно оси LL' , по выходѣ изъ линзы S направляется въ фокусъ Φ' , а лучъ AS , идущій изъ той же точки A по побочной оси AS , выходитъ изъ лин-



фиг. 157.

*) См. „Русскій Астрономическій Календарь на 1901 г.“ стр. 106 и 121.

вы, (почти) не преломляясь § 32. Оба означенные лучи по выходе из линзы пересекаются в точке A' , которая и будетъ изображеніемъ точки A предмета AL . Опустивъ изъ точки A' перпендикуляръ $A'L'$ на ось LL' , мы получимъ въ пересѣченіи его съ осью точку L' , сопряженную съ точкою L и $A'L'$ представитъ изображеніе предмета AL . Изъ подобныхъ треугольниковъ ALS и $SL'A'$ находимъ:

$$\frac{A'L'}{AL} = \frac{L'S}{LS},$$

а изъ подобн. треуг. $ES\Phi'$ и $\Phi'L'A'$ въ свою очередь находимъ:

$$\frac{A'L'}{ES} = \frac{\Phi'L'}{S\Phi'};$$

но можемъ принять $ES = AL$; слѣдов. послѣдняя пропорція переписывается такъ:

$$\frac{A'L'}{AL} = \frac{\Phi'L'}{S\Phi'}.$$

Изъ первой и послѣдней пропорціи заключаемъ, что

$$\frac{L'S}{LS} = \frac{\Phi'L'}{S\Phi'}.$$

Вводимъ такіа обозначенія:

разстояніе предмета отъ линзы $LS = s$,

разстояніе изображенія отъ линзы. $SL' = s'$

и абсолютная велнч. фокуснаго разстоянія линзы $= S\Phi' = f_k$

Тогда послѣдняя пропорція переписывается такъ:

$$\frac{s'}{s} = \frac{s' - f_k}{f_k},$$

откуда

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f_k} \dots \dots \dots (I)$$

Изъ подобныхъ треугольниковъ ASL и $SA'L'$ имѣемъ:

$$\frac{A'L'}{AL} = \frac{y'}{y}$$

или

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \dots \dots \dots (II)$$

Окуляры для микроскоповъ и телескоповъ обыкновенно состоятъ изъ двухъ плосковыпуклыхъ линзъ, отдѣленныхъ другъ отъ друга, нѣкоторымъ пространствомъ. При ахроматизаціи окуляровъ обращается вниманіе [на то, чтобы устранить хроматическую разницу

углового увеличенія, а это, какъ мы видѣли (§ 45), достигается при условіи:

$$d = \frac{f_1 + f_2}{2} \dots \dots \dots (III)$$

гдѣ f_1 и f_2 соответственно выражаютъ абсл. велнч. фокусныхъ разстояній первой и второй линзы, а d — разстояніе между линзами, при чемъ предполагается, что обѣ линзы изъ одного и того же вещества.

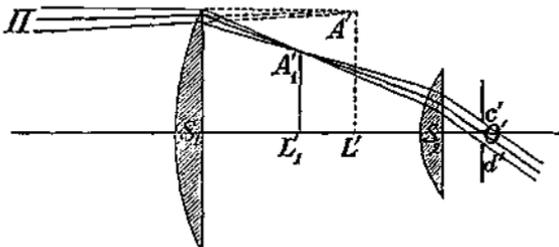
Фокусное разстояніе f всего окуляра согласно § 33 вычисляется по формулѣ:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \dots \dots \dots (IV)$$

Различаютъ два типа окуляровъ: 1) окуляръ Гюйгенса и 2) окуляръ Рамсдена. Оба типа примѣняются, какъ въ телескопахъ, такъ въ микроскопахъ.

§ 92. **Окуляръ Гюйгенса.** Общая отличительная черта въ паружномъ видѣ окуляровъ Гюйгенса это то, что у нихъ обѣ линзы своими выпуклостями о-

бращены къ объективу и кромѣ того диафрагма поля зрѣнія помѣщается между обѣими линзами (фиг. 158). Но въ частностяхъ эти окуляры представляютъ различныя видоизмѣненія. Мы рассмотримъ такой окуляръ



фиг. 158.

Гюйгенса, въ которомъ соблюдено условіе:

$$f_1 = 2f_2.$$

Это условіе, какъ увидимъ, влечетъ за собою условіе:

$$f_1 : d : f_2 = 4 : 3 : 2$$

Условіе $f_1 = 2f_2$ позволяетъ легко найти выраженія остальныхъ элементовъ окуляра въ зависимости отъ фокуснаго разстоянія его f .

Изъ формулы (III) — § 91 находимъ:

$$d = \frac{2f_2 + f_2}{2} = \frac{3}{2} f_2.$$

Изъ форм. (IV) — § 91 находимъ:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{2f_2} + \frac{1}{f_2} - \frac{3f_2}{2f_2 \cdot 2f_2} = \frac{3}{4f_2},$$

откуда

$$f = \frac{4}{8} f_2 = \frac{2}{3} f_1. \text{ Значит } f_1 : d : f_2 = 4 : 3 : 2.$$

На основаніи сказаннаго въ концѣ § 15 мы заключаемъ, что такъ какъ лучи, выходящіе изъ второй линзы S_2 , параллельны другъ другу, то точка A' , находится въ первой фокусной плоскости этой линзы. Значитъ, изображеніе A', L'_1 получается въ первой фокусной плоскости второй линзы и $L'_1 S_2 = f_2$; поэтому:

$$S_1 L'_1 = d - f_2 = \frac{f_2}{2} = \frac{3}{8} f.$$

Эта формула и служитъ для опредѣленія мѣста діафрагмы поля зрѣнія.

Теперь опредѣлимъ максимальное отверстіе этой діафрагмы. Для этого обратимъ вниманіе прежде всего на то, что изображенія $A' L'$ и $A'_1 L'_1$ сопряженные относительно первой линзы S_1 (§ 10) и къ нимъ мы можемъ примѣнить формулы (I) и (II) — § 91. Формула (I) опредѣлитъ намъ разстояніе — $S_1 L' = s$ по заданному разстоянію $S_1 L'_1 = s'$ и извѣстному $f_k = f_1$, а формула (II) по найденнымъ s и s' дастъ значеніе отношенія

$$\frac{A'_1 L'_1}{A' L'} = \text{абс. в. } \frac{y'}{y}.$$

И такъ, принимая въ формулѣ (I)

$$s' = S_1 L'_1 = \frac{3}{8} f,$$

получимъ

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{\frac{3}{8} f} = \frac{1}{f_1}$$

или

$$\frac{-1}{s} + \frac{1}{\frac{3}{8} f} = \frac{1}{\frac{3}{2} f},$$

откуда находимъ, что

$$s = -\frac{f}{2}.$$

Значитъ

$$S_1 L' = -\frac{f}{2}.$$

На основаніи же формулы (II) получаемъ:

$$\frac{A'_1 L'_1}{A' L'} = \text{абс. в. } \frac{y'}{y} = \text{абс. в. } \frac{s'}{s} = \frac{3}{8} f : \frac{f}{2} = \frac{3}{4}$$

$$\text{Слѣдовательно } A', L'_1 = \frac{3}{4} A'L'.$$

Послѣднее равенство даетъ возможность опредѣлить максимумъ отверстія диафрагмы поля зрѣнія. Въ самомъ дѣлѣ на чертѣжѣ (фиг. 158) протяженіе $A'L'_1$ представляетъ максимальное разстояніе отъ оси тѣхъ точекъ изображенія A'_1, L'_1 , до которыхъ доходятъ полныя пучки лучей, какъ напр. пучекъ Π . Если бы пучекъ отклонился отъ оси больше, чѣмъ пучекъ Π , то онъ либо совсѣмъ не попадалъ бы въ окуляръ, либо попадала бы только часть его. Слѣдовательно отръзокъ A', L'_1 представляетъ собою радіусъ диафрагмы поля зрѣнія, ограничивающей то поле предмета, которое изображается равномерно ярко при равномерномъ освѣщеніи послѣдняго. Съ другой стороны, такъ какъ въ слѣдствіе значительнаго разстоянія объектива отъ окуляра главный лучъ $\Pi A'$ почти параллеленъ оси, то можно принять $L'A'$ равнымъ радіусу отверстія первой линзы. Поэтому $A', L'_1 = \frac{3}{4} A'L' = \frac{3}{4} R$,

гдѣ R — радіусъ отверстія первой линзы S_1 .

Еще осталось опредѣлить положеніе выходнаго зрачка O' . Мы уже вспоминали, что выходной зрачекъ $c'd'$ есть изображеніе отверстія объектива, вызванное окуляромъ; но такъ какъ послѣдній довольно далеко располагается отъ объектива *), то можно принять O' совпадающимъ со вторымъ фокусомъ окуляра. Замѣтимъ, что параллельные оси лучи, упавъ на первую линзу S_1 , по выходѣ изъ нея устремляются во второй фокусъ этой линзы, а идя дальше и выйдя изъ второй линзы S_2 , согласно сказанному выше, они должны сходиться почти въ точкѣ O' ; слѣдовательно второй фокусъ первой линзы S_1 и второй фокусъ всего окуляра суть точки сопряженныя относительно второй линзы S_2 . Далѣе, замѣчая, что разстояніе второго фокуса первой линзы S_1 отъ второй линзы S_2 есть $d - f_1$ и примѣняя ко второй линзѣ S_2 формулу (I) — § 91, мы примемъ въ послѣдней

$$s = d - f_1, s' = S_2 O' \text{ и } f_k = f_2,$$

тогда получимъ:

$$\frac{1}{d - f_1} + \frac{1}{S_2 O'} = \frac{1}{f_2}$$

или

$$\frac{1}{\frac{3}{2} f_2 - 2 f_2} + \frac{1}{S_2 O'} = \frac{1}{f_2}.$$

*) Мы имѣемъ въ виду астрономическій окуляръ.

Иногда за условие для рамсденовскаго окуляра берутъ такое выраженіе:

$$f_1 : d : f_2 = 1 : 1 : 1,$$

что равносильно условию:

$$f_1 = d = f_2,$$

тогда на основаніи ур. (IV) — § 91 получается такое равенство:

$$f = f_1 = d = f_2.$$

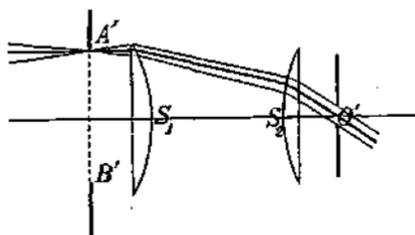
Но при такихъ условіяхъ фокусы окуляра лежатъ въ плоскостяхъ, ограничивающихъ линзы; такъ же точно выходной зрачекъ совпадаетъ съ плоскою поверхностью второй линзы. Последніа два обстоятельства вызываютъ на практикѣ значительныя неудобства. Поэтому на практикѣ разстояніе между линзами чаще всего дѣлается меньше указаннаго (меньше фокуснаго разстоянія каждой линзы), въ слѣдствіе чего фокусы окуляра являются уже въ воздухѣ — внѣ окуляра. При конструкціи окуляра Рамсдена берутъ, напр. такое условіе:

$$f_1 : d : f_2 = 3 : 2 : 3,$$

откуда уже нетрудно найти остальные элементы окуляра въ зависимости отъ одного изъ нихъ подобно тому, какъ это мы дѣлали для окуляра Гюйгенса.

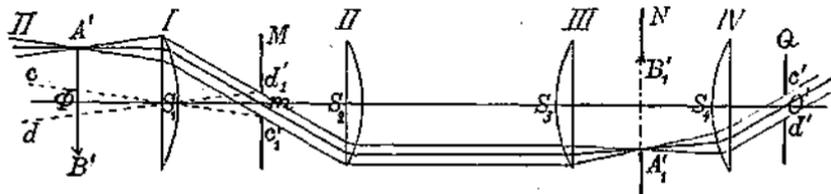
Что касается максимальнаго отверстія діафрагмы поля зрѣнія, то размѣровъ этого отверстія не вычисляютъ, а просто берутъ его нѣсколько меньше отверстія первой линзы S_1 (фиг. 159); хотя въ каждомъ частномъ случаѣ его можно было бы опредѣлить черченіемъ, если бы въ этомъ была какая нибудь особенная надобность. Размѣры и положеніе выходнаго зрачка могутъ быть найдены либо вычисленіемъ, либо черченіемъ, либо тѣмъ простымъ эмпирическимъ приемомъ, о которомъ мы уже упоминали въ § 85.

§ 94. **Земной окуляръ.** Какъ въ микроскопѣ, такъ и въ телескопѣ объективъ даетъ обратное изображеніе наружнаго предмета. Описанные окуляры не измѣняютъ этого изображенія въ прямое. Такъ-что для наблюдателя, смотрящаго въ телескопъ или микроскопъ съ окуляромъ Гюйгенса или Рамсдена, разсматриваемые предметы представляются въ обратномъ видѣ. Это обстоятельство не представляетъ существеннаго неудобства, когда разсматриваются микроскопическіе препараты подъ микроскопомъ или же наблюдаются небес-



фиг. 159.

ныя тѣла. Но если телескопъ употребляется, какъ подзорная труба — для разсматриванія земныхъ предметовъ, то обратность изображенія представляетъ существенный недостатокъ и для устранения его строятся земные окуляры, состоящiе по большей части изъ четырехъ линзъ, отдѣльно расположенныхъ въ особой трубкѣ. На чертежѣ (фиг. 160) представлена схема земного окуляра Доллонда и Фраунгофера.



фиг. 160.

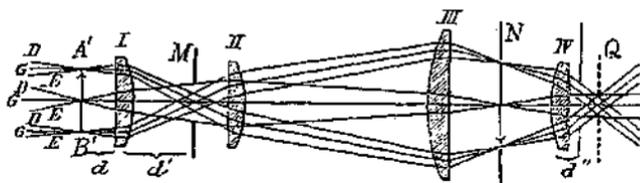
Дѣйствительное изображеніе $A'B'$, даваемое объективомъ отъ наружнаго отдаленнаго предмета и обратное послѣднему, располагается въ плоскости, которая служитъ общою фокусною плоскостью для объектива, окуляра и первой линзы I . Пучекъ лучей Π , падающій изъ точки A' на первую линзу I , по выходѣ изъ нея идетъ такъ, что главный лучъ его направляется въ точку m , которая служитъ фокусомъ для линзы I ; затѣмъ, упавъ на вторую линзу II , онъ (пучекъ) по выходѣ изъ нея идетъ параллельно оси и встрѣчаетъ линзу III . По выходѣ изъ нея лучи пучка сходятся въ точкѣ A'_1 , располагающейся въ фокусной плоскости послѣдней линзы IV , и выходятъ изъ нея параллельно другъ другу, образуя цилиндрическій пучекъ, менѣе болѣе заполняющій выходной зрачекъ $c'd'$. Такимъ образомъ вмѣсто изображенія $A'B'$, обратнаго предмету, является изображеніе $A'_1B'_1$, прямое по отношенію къ послѣднему. Оно то и разсматривается послѣднею линзою IV , какъ въ окулярѣ Гюйгенса.

Диафрагмы располагаются одна M во второй фокусной плоскости первой линзы I , а вторая N въ первой фокусной плоскости послѣдней линзы IV . Отверстіе диафрагмы M есть ничто иное, какъ изображеніе отверстія объектива, который предполагается на значительномъ разстояніи отъ первой линзы. Размѣры и мѣсто отверстія диафр. M можно опредѣлить или вычисленіемъ, или черченіемъ, или эмпирически, поступая слѣдующимъ образомъ. Установивъ телескопъ на безконечность, наводятъ его на свѣтлую часть неба, устраняютъ всѣ линзы въ окулярѣ, оставивъ на прежнемъ мѣстѣ лишь линзу I . Затѣмъ передвигая промасленную бумагу съ дѣленіями передъ оставшеюся линзою I , можно получить на означенной бумагѣ отчетливое минимальное изображеніе въ видѣ свѣтлаго кружка, который и пред-

ставляет некое отверстие диафрагмы M . Если-бы при описанном способѣ трудно было добраться непосредственно до линзы I (въ слѣдствіе того, что она обыкновенно бываетъ въ общей трубкѣ окуляра), то можно было бы воспользоваться особою трубкою съ дномъ изъ промасленной бумаги.

Подобнымъ образомъ можно опредѣлить размѣры и положеніе выходного зрачка $s'd'$, а также отверстия диафрагмы N .

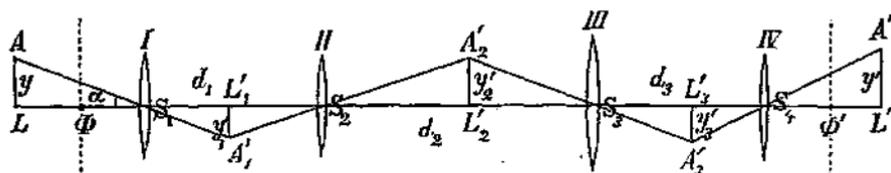
На чертежѣ (фиг. 161) изображена схема земного окуляра, нѣсколько иного типа сравнительно съ только что описаннымъ.



фиг. 161.

Укажемъ на тѣ формулы, которыми пользуются при рѣшеніи нѣкоторыхъ вопросовъ, относящихся къ земному окуляру.

Вообразимъ себѣ вообще систему, состоящую изъ нѣсколькихъ, напр. четырехъ, отдѣленныхъ другъ отъ друга нѣкоторымъ простран-



фиг. 162.

ствомъ весьма тонкихъ линзъ I , II , III и IV (фиг. 162) и введемъ такія обозначенія:

$L S_1 = s_1$	$S_1 L'_1 = s'_1$	$S_1 S_2 = d_1$	$A L = y$
$L'_1 S_2 = s_2$	$S_2 L'_2 = s'_2$	$S_2 S_3 = d_2$	$A'_1 L'_1 = y'_1$
$L'_2 S_3 = s_3$	$S_3 L'_3 = s'_3$	$S_3 S_4 = d_3$	$A'_2 L'_2 = y'_2$
$L'_3 S_4 = s_4$	$S_4 L' = s'_4$		$A'_3 L'_3 = y'_3$
			$A' L' = y'$

Тогда взявъ во вниманіе формулы (I) и (II) — § 91 и пользуясь чертежемъ (фиг. 162), можемъ написать слѣдующій рядъ формулъ:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1} \\ \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_2} \\ \frac{1}{s_3} + \frac{1}{s'_3} = \frac{1}{f_3} \\ \frac{1}{s_4} + \frac{1}{s'_4} = \frac{1}{f_4} \end{array} \right\} \begin{array}{l} s'_1 + s_2 = d_1 \\ s'_2 + s_3 = d_2 \\ s'_3 + s_4 = d_3 \end{array} \dots (105)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{y'_1}{y} = \frac{s'_1}{s_1} \\ \frac{y'_2}{y'_1} = \frac{s'_2}{s_2} \\ \frac{y'_3}{y'_2} = \frac{s'_3}{s_3} \\ \frac{y'}{y'_3} = \frac{s'_4}{s_4} \end{array} \right\} \dots (106)$$

Перемноживъ равенства (106) и сдѣлавъ возможные сокращенія, получимъ:

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'_1 s'_2 s'_3 s'_4}{s_1 s_2 s_3 s_4},$$

откуда имѣемъ:

$$y' : \frac{y}{s_1} = \frac{s'_1 s'_2 s'_3 s'_4}{s_2 s_3 s_4} \dots (107)$$

Но изъ чертежа видно, что

$$AL = LS_1 \operatorname{tg} \alpha$$

или

$$y = s_1 \operatorname{tg} \alpha$$

поэтому равенство (107) переписется такъ:

$$\frac{y'}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{s'_1 s'_2 s'_3 s'_4}{s_2 s_3 s_4} \dots (108)$$

Пусть теперь предметъ AL (фиг. 162), безпредѣльно удаляясь отъ линзы I влѣво, возрастаетъ такъ, что уголь AS_1L сохраняетъ свою величину α . Если предметъ AL удалится влѣво весьма далеко, то онъ будетъ виденъ изъ точки S_1 (или изъ какой ниб. другой точки, находящейся недалеко отъ S_1) подъ нѣкоторымъ угломъ α подобно тому, какъ громадное солнце, находясь весьма далеко отъ насъ, видно намъ подъ нѣкоторымъ угломъ. Но тогда лучи идущіе изъ любой точки такого отдаленнаго предмета, считаются параллельными и по выходѣ изъ всей системы они собираются въ точкѣ, лежащей въ фокусной плоскости Φ' всей системы (фиг. 162). Слѣдовательно

по мѣрѣ удаленія предмета AL влѣво изображеніе его $A'L'$ приближается къ фокусной плоскости \mathcal{F}' . Теперь спрашивается, что представить выраженіе $\frac{y'}{\operatorname{tg} \alpha}$, когда предметъ удалится влѣво весьма далеко. Вспоминая правило, выведенное въ § 16, мы приходимъ къ заключенію, что въ этомъ случаѣ надо принять:

$$\frac{y'}{\operatorname{tg} \alpha} = f,$$

гдѣ f —фокусное разстояніе всей системы; слѣдовательно:

$$f = \frac{f_1 s'_2 s'_3 s'_4}{s_2 s_3 s_4} \quad (\text{при } s_1 = \infty) \quad (109)$$

Нетрудно сообразить, что по мѣрѣ удаленія предмета AL влѣво изображеніе его $A'L'$, даваемое одною лишь первою линзою I , стремится къ фокусной плоскости этой линзы. Значитъ, въ то время, какъ при весьма большомъ разстояніи LS_1 предмета LA выраженіе $\frac{y'}{\operatorname{tg} \alpha}$ считается равнымъ f , выраженіе s'_1 надо считать равнымъ

f_1 , гдѣ f_1 , по прежнему, обозначаетъ фокусное разстояніе линзы I § 31. Вотъ почему въ формулѣ (109) вмѣсто s'_1 написано f_1 .

Замѣтимъ еще, что при весьма большомъ разстояніи предмета AL , величина s'_4 , равная вообще $S_4 L'$, выражаетъ разстояніе второго фокуса всей системы отъ послѣдней поверхности всей системы.

Предполагая величины $f_1, f_2, f_3, f_4, d_1, d_2$ и d_3 извѣстными и принимая въ формулахъ (105) $s_1 = \infty$, мы при помощи ихъ можемъ послѣдовательно находить значенія $s'_1, s_2, s'_2, s_3, s'_3, s_4$ и s'_4 . Последняя величина s'_4 опредѣляетъ (при $s_1 = \infty$) положеніе фокуса \mathcal{F}' относительно системы. Затѣмъ, на основ. формулы (109) найдемъ и фокусное разстояніе системы f . Зная положеніе фокуса \mathcal{F}' и фокусное разстояніе f , можемъ опредѣлить положеніе и второй главной точки H' системы.

Если же мы въ формулахъ (105) примемъ $s'_4 = \infty$, то на основаніи этихъ формулъ, сможемъ вычислять послѣдовательно $s_4, s'_3, s_3, s'_2, s_2, s'_1$ и s_1 . Значеніе s_1 въ этомъ случаѣ покажетъ положеніе перваго фокуса \mathcal{F} системы относительно самой системы. Что же касается перваго фокуснаго разстоянія системы, то оно такое же (по абсолют. величинѣ), какъ и второе фокусное разстояніе, такъ какъ первая и послѣдняя средины одинаковы (воздухъ)—§ 19 ур. (43). Такимъ образомъ формулы (105) и (109) въ примѣненіи къ земному окуляру даютъ возможность опредѣлить положеніе фокусовъ и значеніе фокусн. разст. его.

Зная фокусное расстояние F объектива, фокусное расстояние f окуляра и диаметр D отверстия объектива, мы можем вычислить и диаметр d выходного зрачка, пользуясь уже известною нам формулою § 86:

$$\frac{F}{f} = \frac{D}{d} \dots \dots \dots (110)$$

откуда имеемъ:

$$d = \frac{f}{F} D.$$

Изъ последней формулы непосредственно слѣдуетъ, что

$$r = \frac{f}{F} R,$$

гдѣ r и R радиусы выходного зрачка и отверстия объектива. Яркость изображенія пропорціональна квадрату r , если только радиусъ выходного зрачка не больше радиуса глазного зрачка.

Зная положеніе перваго фокуса окуляра, т. е. ΦS_1 , мы можемъ на основаніи формулы (II) — § 91 вычислить размѣры отверстия диафрагмы M (фиг. 160). Разсуждаемъ такъ. Отверстіе диафрагмы M , какъ уже было упомянуто раньше, представляетъ собою изображеніе отверстия объектива, произведенное линзою I . Значитъ, чтобы вычислить диаметр отверстия диафр. M , стоитъ только въ формулѣ (II) — § 91 принять

$s = OS_1 = O\Phi + \Phi S_1 =$ расстояние объектива отъ линзы I ,

$s' = S_1 m =$ расстояние диафр. M отъ линзы I ,

$y = R =$ радиусу отверстия объектива,

и $y' = \rho =$ радиусу отверстия диафр. M .

Тогда по известнымъ тремъ первымъ величинамъ можемъ опредѣлить четвертую $y' = \rho$.

Что касается $S_1 m$, то въ случаѣ, если объективъ очень далеко отстоитъ отъ окуляра (что имѣетъ мѣсто, когда фокусное расстояние объектива очень велико), расстояние $S_1 m$, равное s' , можно принять равнымъ f_1 (фокусному расстоянію линзы I ; но вообще s' всегда можно вычислить по формулѣ (I) — § 91, принимая въ ней

$$s = OS_1 \text{ и } f_k = f_1.$$

Размѣры отверстия диафр. поля зрѣнія N (фиг. 160) можно находить, исходя изъ той точки зрѣнія, что $A'B'$ представляетъ собою изображеніе для $A'B'$, вызываемое системою первыхъ трехъ линзъ $I + II + III$; а $A'B'$ представляетъ наибольшее изображеніе отдаленнаго предмета, даваемое объективомъ, лежащее (почти) въ фокусной

плоскости объектива и посылающее въ окуляръ изъ всѣхъ своихъ точекъ еще полныя пучки свѣта § 92.

Увеличеніе подзорной трубы съ земнымъ окуляромъ можетъ быть опредѣлено, какъ и увеличеніе телескопа, по формулѣ

$$Y = \frac{F}{f}.$$

Формулы (105) и (109) были выведены для идеальныхъ линзъ и въ приложеніи къ окуляру, онѣ, конечно, даютъ приближенныя выводы, такъ какъ линзы въ окулярѣ имѣютъ опредѣленную толщину (не равную нулю). Но надо замѣтить, что къ окуляру вообще не предъявляется столь строгихъ требованій, какія предъявляются къ объективу. Собственно говоря, къ окуляру подлежало бы предъявлять еще такіа два требованія: окуляръ долженъ представлять собою систему 1) ортоскопическую и 2) свободную отъ астигматизма. Это потому, что изображеніе въ немъ происходитъ посредствомъ пучковъ, хотя и узкихъ, но наклоненныхъ къ оси подъ значительными подчасъ углами. Оптики при устройствѣ окуляровъ иногда находятъ нужнымъ считаться съ послѣдними двумя требованіями въ особенности съ первымъ и существуютъ даже такъ называемые „ортоскопическіе окуляры“. Но и тѣ окуляры, которые мы описали, вообще не грѣшатъ *сильно* противъ ортоскопій точно такъ же, какъ и относительно астигматизма.

Ниже приведены данныя для устройства земного окуляра. Данныя относятся къ черт. (фиг. 161).

1.	Фокусное разстояніе <i>I</i> линзы	42,39 мм.
2.	„ „ <i>II</i> „	51,70 „
3.	„ „ <i>III</i> „	59,01 „
4.	„ „ <i>IV</i> „	32,48 „
5.	Разстояніе <i>I</i> линзы отъ <i>II</i>	63,07 „
6.	„ <i>II</i> „ „ <i>III</i>	96,91 „
7.	„ <i>III</i> „ „ <i>IV</i>	49,81 „
8.	Разст. перваго изображенія <i>A'B'</i> отъ первой линзы <i>I</i>	16,08 „
9.	Разстояніе глаза отъ <i>IV</i> линзы	21,49 „
10.	Діаметръ отверстія линзъ <i>I</i> и <i>II</i>	16,51 „
11.	Разстояніе діафрагмы <i>M</i> отъ <i>I</i> линзы.	45,75 „
12.	Діаметръ отверстія діафрагмы <i>M</i>	4,55 „
13.	Діаметръ отверстія линзы <i>III</i>	29,51 „
14.	„ „ „ <i>IV</i>	16,51 „
15.	Діаметръ максимальнаго отвер. діафрагмы поля зрѣнія <i>N</i> въ фокусѣ <i>IV</i> линзы.	24,90 „
16.	Уголъ поля зрѣнія	102 мин.

- | | | | |
|-----|--|--------|-----|
| 17. | Разстояніе крышки окуляра отъ IV линзы | 10,56 | mm. |
| 18. | Диаметръ отверстія въ крышкѣ | 8,12 | „ |
| 19. | Длина всей окулярной трубки | 216,56 | „ |
| 20. | Фокусное разстояніе всего окуляра | 20,84 | „ |
| 21. | Увеличеніе | 26, | |
| 22. | если фокусное разстояніе объектива | 541,4 | „ |
| 23. | и диаметръ отверстія послѣдняго | 47. | „ |

Протяженія выражены въ миллиметрахъ. Понятно, что умноживъ всё эти числа (кромѣ чиселъ въ строкахъ 16 и 21) на одно и то же число, мы получимъ новую комбинацію, въ которой окуляръ будетъ имѣть новое фокусное разстояніе. Такыхъ комбинацій можно составить сколько угодно.

Написанныя численные данныя относятся къ опредѣленному объективу. Но можно комбинировать тотъ же окуляръ и съ инымъ объективомъ, у котораго иное отверстіе и иное фокусное разстояніе; только, чтобы окуляръ вполне соответствовалъ новому объективу, надо въ первомъ надлежащемъ образомъ измѣнить элементы, обозначенные въ строкахъ 12 и 18; кромѣ того для новаго объектива числа въ строкахъ 16 и 21 вообще будутъ иныя. Значитъ, для новаго объектива могутъ измѣниться данныя въ строчкахъ 12, 16, 18 и 21.

На основаніи формулы (110) имѣемъ

$$\frac{D}{F} = \frac{d}{f},$$

т. е. относительныя отверстія объектива и окуляра одинаковы. Но понятно, что такое соотношеніе имѣетъ мѣсто лишь тогда, когда окуляръ вполне соответствуетъ объективу. Относительное отверстіе для телескопа въ большинствѣ случаевъ колеблется между $\frac{1}{10}$ и $\frac{1}{20}$.

Для испытанія данныхъ въ приведенной выше таблицѣ я устроилъ по нимъ земной окуляръ, который оказался хорошимъ и я имъ пользуюсь до сихъ поръ для своего телескопа.



фиг. 162 а.

Приготовивъ стекла для окуляра, оптики, прежде чѣмъ ихъ закрѣплять, считаютъ полезнымъ, не ограничиваясь теоретическими данными, подыскать предварительнымъ испытаніемъ найвыгоднѣйшее рас-

положеніе этихъ стеколъ. Подобныя испытанія дѣлаются и относительно другихъ обстоятельствъ и только послѣ всесторонняго изслѣдованія отдѣльныя части закрѣпляются на опредѣленныхъ мѣстахъ. Опытъ иногда въ короткій промежутокъ времени даетъ больше, чѣмъ продолжительныя теоретическія соображенія.

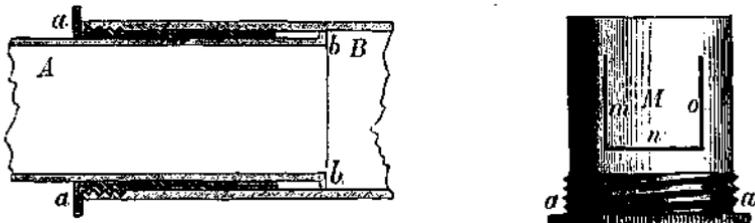
Слѣдуетъ обратить вниманіе на то, что плоскость крышки окуляра не находится въ плоскости выходнаго зрачка. Послѣдній находится вѣ крышки, дабы зрачекъ глаза вмѣлъ возможность совпадать съ выходнымъ зрачкомъ.

На чертежѣ (фиг. 162 а) представленъ земной окуляръ въ оправѣ.

§ 95. **Черненіе.** Для устранения посторонняго вреднаго свѣта трубка окуляра внутри покрывается матовою черною краскою. То же самое дѣлается и съ діафрагмами. Для покраски готовится особый матовый черный лакъ. Въ спиртѣ растворяють пемного шеллаку. Затѣмъ берутъ хорошую голландскую сажу, просѣивають ее черезъ сито, употребляющееся для просѣиванія весьма тонкихъ порошковъ, всыпають въ упомянутый растворъ и взбалтываютъ. Количество выпаеомой сажи должно быть обильное. Шеллакъ вводится для того, чтобы сажа приставала къ металлу, а обильное количество ея нужно для того, чтобы послѣ покраски получалась матовая поверхность. Впрочемъ есть въ продажѣ готовый *матовый черный* лакъ. При покраскѣ металлическихъ вещи должны быть нѣсколько подогрѣты. Надо избѣгать красить то же мѣсто два раза. Черненіе діафрагмъ лучше производить химическимъ путемъ, если онѣ изъ латуни или красной мѣди. Для этой цѣли бросаютъ въ азотную кислоту небольшое количество ляписа ($AgNO_3$). При взбалтываніи онъ въ ней растворяется. Латунную вещь, подлежащую черненію, очищаютъ отъ случайныхъ жирныхъ веществъ, вываривая ее въ водномъ растворѣ соды. Затѣмъ, промывъ и высушивъ эту вещь, опускають ее на латунной проволоцѣ въ упомянутую азотную кислоту и сейчасъ же вынимають, кладутъ на раскаленные древесные угли и нагрѣвають, пока вещь не почернѣетъ. Когда вещь почернѣетъ, ее надо немедленно снять съ углей, а когда она остынетъ, ее слѣдуетъ слегка протереть щеточкою. Въ случаѣ если-бы черненіе вышло неудачнымъ, можно повторить ту же манипуляцію, начиная съ обмакиванія вещи въ азотную кислоту. Чтобы придать вещи болѣе пріятный видъ, ее послѣ протиранія щеткою протирають тряпкою, нѣсколько увлажненною масломъ, а подъ конецъ — сухою. Можно азотную кислоту съ ляписомъ замѣнить насыщеннымъ растворомъ красной мѣди въ азотной же кислотѣ.

§ 96. **Соединеніе выдвижныхъ трубокъ.** Окуляръ помѣщается въ трубку, которая должна быть такъ приспособлена въ телескопѣ,

чтобы ее можно было или нѣсколько выдвинуть или нѣсколько вдвинуть для достиженія надлежащей установки окуляра. На чертежѣ (фиг. 163) схематически изображено, какъ соединяется трубка *A*, въ которой предполагается окуляръ, съ трубкою *B*, неизмѣнно соединенною съ трубою телескопа (или подзорной трубы). Трубка *A* обхватывается кольцомъ *aa* съ винтовою нарѣзкою, при помощи которой оно завинчивается въ трубку *B*. На чертежѣ представленъ случай, когда трубку *A* можно выдвигать влево до извѣстнаго предѣла, пока она своими краями *bb*, выдающимися наружу, не заденетъ о край кольца *aa*. Такъ бываетъ въ подзорныхъ трубахъ; въ телескопахъ же трубка *A* не имѣетъ выдающихся частей *bb* и ее можно совсѣмъ удалить изъ трубки *B* и замѣнить другою трубкою съ инымъ окуляромъ. Направо (фиг. 163) изображено кольцо *aa* отдѣльно. На



фиг. 163.

противоположныхъ сторонахъ его поверхности сдѣланы по три прорѣза *m*, *n* и *o* подъ прямымъ угломъ. Слабымъ нажатіемъ пальца языкъ *M* нѣсколько вдается во-внутрь, благодаря чему кольцо *aa* плотнѣе обхватываетъ трубку *A*. Въ большихъ телескопахъ трубка съ окуляромъ передвигается при помощи кремальеры. На чертежѣ стѣнки трубокъ представлены очень толстыми. Въ дѣйствительности толщина стѣнокъ бываетъ около $\frac{1}{2}$ мм. или $\frac{1}{4}$ мм.

Оптическія оси окуляра и объектива должны совпадать не только другъ съ другомъ, но и съ осью трубы телескопа.

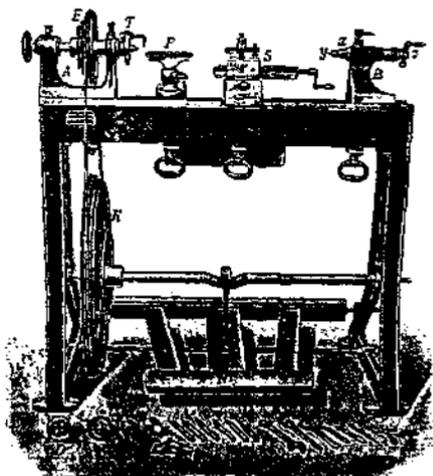
ГЛАВА VI.

Оптическая техника.

Приготовление линзъ.

§ 97. Предварительныя замѣчанія. (Токарный станокъ). Намъ необходимо, хоть отчасти, познакомиться съ нѣкоторыми существенными частями токарнаго станка, такъ какъ объ нихъ будемъ въ послѣдствіи часто говорить. Токарный станокъ — это могущественное орудіе при производствѣ разныхъ инструментовъ. Фигура С изображаетъ токарный станокъ. Онъ состоитъ прежде всего изъ *станины* *MM*, которая поддерживается на ножкахъ и представляетъ обыкновенно два бруска, скрѣпленныхъ параллельно другъ-другу. Верхняя

поверхность этихъ брусковъ аккуратно острогана. На станинѣ закрѣпляются почти всѣ существенныя части токарнаго станка. На лѣвомъ концѣ ея закрѣпляется *неподвижная (передняя) бабка А*. Въ ней находится стержень — *шпиндель*, способный вращаться. Ось вращенія шпинделя должна быть параллельна брускамъ станины. На правомъ концѣ шпинделя находится винтовая наръзка, на которую навинчивается тотъ или другой *патронъ*. Патронъ служитъ для закрѣпленія обрабатываемаго предмета. На нашемъ чертежѣ (фиг. С)



фиг. С.

изображенъ навинченнымъ на шпиндель не патронъ, а кружокъ *T* съ крючкомъ, употребляемый при обтачиваніи длинныхъ предметовъ; внизу же буквою *D* обозначенъ восьмивинтовый патронъ, а вправо

отъ него изображены другіе патроны, рѣзцы, ключи и вообще разныя принадлежности. На шпиндель находится шкивъ *E*.

На томъ же чертежѣ (фиг. С) изображены еще слѣдующія части, располагающіяся на станинѣ: *подвижная (задняя) бабка В*, *супортъ S* и *подручникъ Р*. Подвижная бабка *В* спаждена цилиндрическимъ стержнемъ *x*, который способенъ выдвигаться влево или вправо вращеніемъ ручки *z*. Въ лѣвомъ концѣ выдвигного стержня *x* находится углубленіе, въ которое вставляется стальной *конусъ (центръ или кернеръ) у*. Въ конусъ упирается правый конецъ обрабатываемаго предмета, если послѣдній очень длиненъ и одного закрѣпленія въ патронѣ было бы недостаточно. Въ супортъ закрѣпляется *рѣзецъ*, т. е. ножъ, при помощи котораго снимается стружка съ обтачиваемаго предмета. Подручникъ *Р* служитъ для того, чтобы опереть на немъ инструментъ (рѣзецъ), когда желаютъ обтачивать вручную (безъ супорта). Подвижная бабка *В*, супортъ *S* и подручникъ *Р* могутъ быть передвигаемы вдоль станины *MM* въ ту или другую сторону и закрѣпляемы въ любомъ мѣстѣ. На станинѣ можно закрѣпить еще *люнетъ*. Онъ пужень, когда напр. обтачиваются внутреннія стѣнки длинной трубки. Тогда правый конецъ такой трубки держится въ люнетѣ.

Обтачиваніе вообще производится такимъ образомъ, что, дѣйствуя ногою на педаль *N* приводятъ маховое колесо *K* въ движеніе (вращательное), которое при посредствѣ безконечнаго ремня, обхватывающаго маховое колесо *K* и шкивъ *E*, передается шпинделю. вмѣстѣ со шпинделемъ вращается навинченный на него патронъ, а слѣдовательно и тотъ предметъ, который закрѣпленъ въ патронѣ. Рѣзецъ захватываетъ своимъ заостреннымъ концомъ стружку и снимаетъ ее съ обтачиваемаго предмета. Конецъ острія рѣзца долженъ быть на такой же высотѣ, какъ и геометрическая ось вращенія шпинделя. Рѣзцы бываютъ самые разнообразныя, смотря по роду работы, для которой они предназначаются.

§ 98. Общія замѣчанія объ изготовленіи оптическихъ системъ.

Изготовленіе оптической системы распадается на двѣ части: теоретическую и практическую. Теоретическая часть состоитъ въ вычисленіи этой системы или въ опредѣленіи радіусовъ тѣхъ поверхностей, которыми должны быть ограничены линзы, входящія въ составъ системы, а также въ опредѣленіи толщины и разстояній этихъ линзъ и въ подысканіи невыгоднѣйшихъ веществъ для нихъ. Практическая же часть состоитъ въ непосредственномъ изготовленіи системы изъ опредѣленнаго матеріала.

Съ теоретическою стороною мы знакомимся въ предыдущихъ параграфахъ. Намъ остается еще познакомиться съ практическою

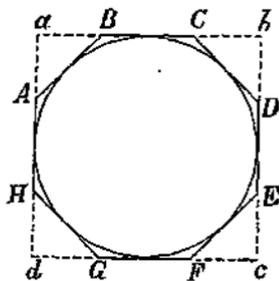
стороною изготовленія системы, т. е. съ тѣмъ, какъ по даннымъ, найденнымъ теоретическимъ путемъ, на самомъ дѣлѣ изготовить оптическую систему, при чемъ мы будемъ имѣть въ виду прежде всего и главнымъ образомъ изготовленіе линзъ.

Выписывая (напр. изъ Жени отъ Шотта) стекло, какъ матеріалъ для изготовленія линзъ, слѣдуетъ требовать, чтобы оно было медленно охлажденное (*feingekühltes Glas*) и чтобы указаны были показатели преломленія его для важнѣйшихъ лучей C, D, F, G' такъ какъ всякое новое приготовленіе стекла, хотя бы даже одного и того же типа, всегда вноситъ нѣкоторую разницу въ показателяхъ преломленія и въ виду этой разницы иногда приходится дѣлать нѣкоторыя поправки въ тѣхъ результатахъ, которые даетъ теоретическое вычисленіе. Обыкновенно фабрикантъ не указываетъ показат. прел. для каждаго цвѣта, но зато сообщаетъ такія данныя, которыя вполне достаточны для опредѣленія показат. преломленія.

Стекло въ сыромъ видѣ выписывается или въ видѣ кружковъ или въ видѣ четырехугольных пластинокъ опредѣленной толщины.

Чтобы сберечь время при шлифовкѣ стекла, слѣдуетъ при заказѣ требовать, чтобы толщина пластинокъ была только немногимъ больше толщины самихъ линзъ, которыя имѣютъ быть приготовлены изъ этихъ пластинокъ.

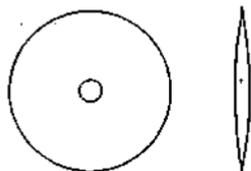
§ 99. **Предварительная грубая обработка стекла.** Предположимъ, что намъ нужно приготовить линзу изъ четырехугольной пластинки (фиг. 164). Прежде всего у этой пластинки надо отломать углы a, b, c и d и придать ей менѣе болѣе видъ кружка. Я опишу тотъ способъ, которымъ самъ пользовался при отламываніи угловъ. На означенной пластинкѣ чертится чернилами кругъ, котораго діаметръ нѣсколько больше діаметра изготовляемой линзы. Потомъ, проводятся касательныя AB, CD, EF и GH . Затѣмъ, по этимъ касательнымъ надо вырѣзать каналы. Это дѣлается такъ. На токарномъ станкѣ вытачивается изъ хорошей стали кружокъ такихъ примѣрно размѣровъ, какъ на чертежѣ (фиг. 165). Пра-



фиг. 164.

вая фигура показываетъ, какъ представлялся бы кружокъ, если-бы глазъ наблюдателя находился въ плоскости кружка. Шлифовать, а тѣмъ болѣе полировать кружокъ совсѣмъ не слѣдуетъ. Означенный кружокъ нагревается до ярко-краснаго каленія и быстро опускается въ воду. Погруженіе въ воду должно совершаться быстро и непремѣнно такъ, чтобы кружокъ падалъ въ воду ребромъ, т. е. такъ, чтобы плоскость его во время погруженія была по возможности

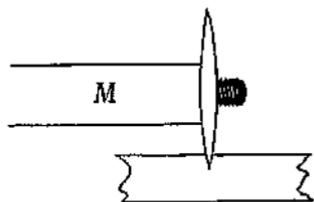
перпендикулярна къ поверхности воды, ибо въ противномъ случаѣ онъ покоребится. Такъ закаленный кружокъ (и неоступщенный) оказывается настолько твердымъ, что можетъ рѣзать стекло. Навинтивъ приготовленный такимъ образомъ кружокъ на стержень *M*



фиг. 165.

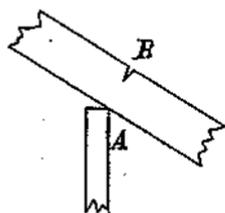
(фиг. 166), зажатый въ патронъ токарнаго станка и приведя его въ быстрое вращеніе, подставляемъ стеклянную пластинку, удерживая ее въ рукахъ такъ, чтобы края кружка касались, напр. черты *AB* (фиг. 164), проведенной на ней. При этомъ кружокъ не замедлитъ образовать углубленіе. Тогда

подводятъ подъ края кружка новыя мѣста линіи *AB*, пока вдоль нея не образуется углубленіе. Но не надо забывать, что во время этой работы кружокъ долженъ быть смачиваемъ керосиномъ. Для этой цѣли можно подвѣсить на держателѣ (стативѣ) тряпочку такъ, чтобы она падала на края кружка и затѣмъ по временамъ полввать ее керосиномъ. Въ теченіе какихъ нибудь 10 минутъ глубина канала достигаетъ 1 мм. или болѣе. Тогда уже легко отломать уголь *aAB* (фиг. 164). Для этого слѣдуетъ опереть пластинку о ребро какого нибудь твердаго предмета, напр. напильника, зажатого въ тискахъ такъ, чтобы ребро послѣдняго располагалось менѣе болѣе параллельно каналу *B* (фиг. 166 а), вырѣзанному кружкомъ, и затѣмъ, давленіемъ руки отламывается уголь. Подобнымъ образомъ отламываются и остальные углы пластинокъ. Чтобы еще болѣе заокруглить пластинку, нѣкоторыя выдающіяся части ея открашиваются щипцами.



фиг. 166.

Для этой цѣли удобны большіе круглогубцы. Даже есть въ продажѣ особыя круглогубцы, по формѣ напоминающіе тѣ щипцы, какіе употребляются для завивки волосъ, только отличающіеся отъ послѣднихъ болѣе большими размерами и болѣею прочностью. Такіе щипцы готовятся специально для открашиванія краевъ пластинокъ. Если пластинка небольшая и довольно тонкая, то углы ея открашиваются сразу



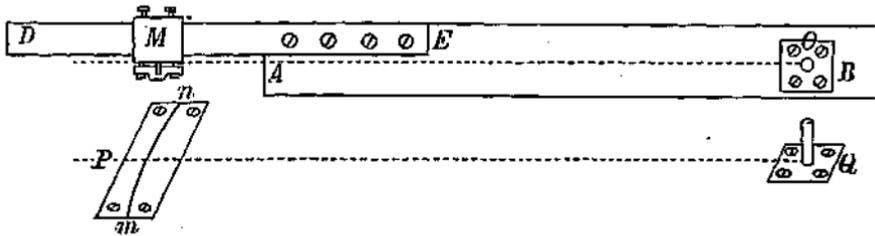
фиг. 166 а.

означенными щипцами—безъ предварительнаго отламыванія. Можно пользоваться и такими щипцами, какими пользуются для отрѣзыванія проволоки. Чтобы еще болѣе облегчить дальнѣйшую обработку стеклянной пластинки, можно нѣсколько опиловать ее на кругломъ

вращающемся точильномъ камнѣ (песчаникѣ), смачиваемомъ водою. Последняя манипуляція въ особенности умѣстна, когда готовятся небольшія линзы, напр. діаметромъ въ 2—3 сант. Такимъ путемъ можно придать стеклу хоть приблизительно ту форму, которую оно должно имѣть.

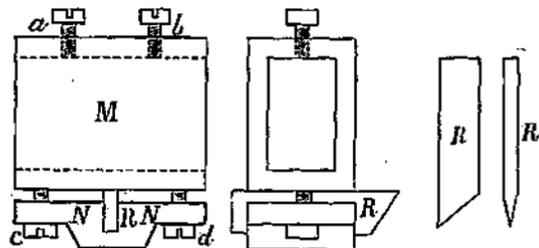
§ 100. Приготовление шлифовальныхъ формъ. Сферометръ.

Послѣ описанной грубой обработки приступаютъ къ формальному шлифованію линзъ, которое производится въ особыхъ *шлифовальныхъ чашкахъ* или *формахъ*. Шлифовальные чашки или формы готовятся по заранѣе заготовленнымъ шаблонамъ (лекаламъ). Я опишу способъ, которымъ самъ пользовался при изготовленіи шаблоновъ, когда мнѣ



фиг. 167.

приходилось готовить шлифовальныя формы, радіусы которыхъ были значительны и достигали одного (и болѣе) метра. Были заготовлены два четырехгранныхъ деревянныхъ бруска съ прямыми ровными краями длиною приближ. въ 2 метра. На одномъ концѣ перваго бруска *AB* (фиг. 167) сильно привинчивался желѣзный четырехгранный брусокъ *DE*; тогда какъ на другомъ концѣ или на нѣкоторомъ разстояніи отъ него привинчивалась металлическая пластинка *B* съ отверстіемъ по серединѣ *O*. На желѣзный брусокъ *DE* надѣвалась четырехгранная муфта *M*, изображенная отдѣльно на чертежахъ, (фиг. I и II). При помощи винтовъ *a* и *b* эта муфта могла быть закрѣплена на брускѣ *DE* въ произвольномъ мѣстѣ.



фиг. I.

фиг. II.

фиг. III.

Она служила для помѣщенія рѣзца *R*, который входилъ нѣсколько въ каналъ, выпиленный въ металлической части *NN*, и при помощи винтовъ *c* и *d* могъ быть сильно прижатъ къ муфтѣ.

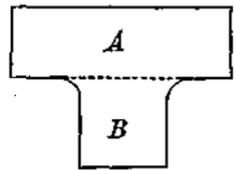
Чертежъ (фиг. I) представляетъ видъ муфты сбоку, а чертежъ (фиг. II) показываетъ, какъ представилась бы муфта съ рѣзцомъ, если на нее смотрѣть со стороны ея отверстія. Рѣзецъ обозначенъ одною

и тою же буквою *R* на всехъ чертежахъ (фиг. I, II и III). На последнемъ чертежѣ (фиг. III) рѣзецъ представленъ съ двухъ сторонъ.

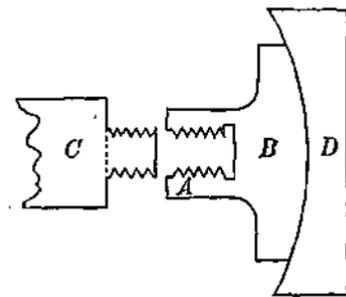
На первый брусокъ *AB* клался другой деревянный брусокъ и при помощи его проводилась карандашомъ по поверхности перваго бруска *AB* прямая линия, которая на черт. (фиг. 167) изображена пунктирно. После этого муфта *M* (фиг. 167) закрѣплялась въ такомъ мѣстѣ, чтобы разстояніе центра отверстія *O* до острія рѣзца, закрѣпленнаго въ муфтѣ, какъ разъ равнялось длинѣ одного изъ вычисленныхъ радиусовъ для поверхности линзы. Проведенная карандашомъ линия служила для болѣе аккуратнаго измѣренія разстоянія отъ центра отверстія *O* до острія рѣзца. Затѣмъ, къ ровной доскѣ (или къ ровному полу) привинчивалась пластинка *Q* съ цилиндрическимъ стержнемъ, который какъ разъ могъ войти въ отверстіе *O*. Къ той же доскѣ (или къ полу) на разстояніи, приблизительно равномъ упомянутому радиусу, привинчивались двѣ сложенные вмѣстѣ ровныя пластинки *P*, вырѣзанныя изъ цинковаго листа, толщиной около 0,5 мм. Затѣмъ, брусокъ *AB* располагался вдоль *PQ* (фиг. 167) такъ, чтобы вертикальный стержень пластинки *Q* попадалъ въ отверстіе *O*. Тогда конецъ рѣзца, закрѣпленнаго въ муфтѣ, опирался на поверхность одной (верхней) изъ упомянутыхъ двухъ цинковыхъ пластинокъ; такъ что образовался родъ циркуля. Взявъ его рукою близь того мѣста, гдѣ находилась муфта и вращая около стержня *Q*, можно было на поверхности цинковой пластинки проводить дугообразную черту. Слегка прижавъ рѣзецъ къ пластинкѣ и повторяя упомянутое вращеніе, можно было черту дѣлать все болѣе и болѣе глубокою, пока наконецъ остріе рѣзца не прорѣзывало верхней пластинки насквозь. Тогда верхняя разрѣзанная пластинка отвинчивалась и въ результатѣ изъ нея получались два шаблона: одинъ съ вогнутымъ краемъ, а другой—съ выпуклымъ. Случайныя зазубрины устраняются мелкимъ напильникомъ и пришлифовкою. Хотя желательно, чтобы разрѣзываніе совершалось безъ зазубринъ и поэтому подъ верхнюю пластинку подкладывается другая. Благодаря этой другой пластинкѣ разрѣзъ является болѣе ровнымъ и правильнымъ. Чтобы рѣзецъ во время разрѣзыванія пластинки не дрожалъ, его остріе должно только чуть-чуть выходить наружу и самъ онъ долженъ быть крѣпко зажатъ. На каждомъ изъ двухъ шаблоновъ надписывается длина радиуса дуги *mn* (фиг. 167), по которой совершился разрѣзъ.

Не надо упускать изъ виду, что для каждой поверхности линзы нужно заготовить по два такихъ шаблона, какъ только что описанные. Когда шаблоны готовы, приступаютъ къ изготовленію шлифовальныхъ формъ. Сначала по заранѣе заготовленной деревянной модели отливаютъ предметъ вида, какъ на черт. (фиг. 168). Означен-

ный отливко́къ (фиг. 168) готовятъ по большей части изъ латуни. Онъ состоитъ изъ кружка *A* съ цилиндрическимъ придаткомъ *B*. Отливко́къ закрѣпляютъ въ патронъ цилиндрическимъ придаткомъ наружу и обтачиваютъ на токарномъ станкѣ сначала сторону съ цилиндромъ *B*, приче́мъ высверливаютъ въ цилиндрѣ углубленіе и дѣлаютъ въ немъ винтовую нарезку. Затѣмъ отливко́къ вынимаютъ изъ патрона, зажимаютъ въ восьмивинтовый патронъ цилиндрической стержень *C* (фиг. 169) изъ желѣза или стали, обтачиваютъ его надлежащимъ образомъ и дѣлаютъ подходящую винтовую нарезку, на кото-



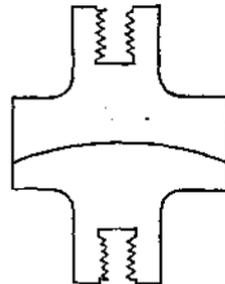
фиг. 168.



фиг. 169.

рую навинчиваютъ отливко́къ и обрабатываютъ другую его сторону, вытачивая на ней или сферическую вогнутость или выпуклость, смотря потому, какую шлифовальную форму хотятъ приготовить изъ даннаго отливка. Во всякомъ случаѣ для каждой поверхности линзы должны быть заготовлены двѣ шлифовальныя формы: одна съ вогнутою сферич. поверхностью, а другая съ выпуклою. Шлифовальная форма

съ вогнутою сферическою поверхностью готовится по шаблону съ выпуклымъ краемъ, тогда какъ шлифовальная форма съ выпуклою сферическою поверхностью готовится по шаблону съ вогнутымъ краемъ. Во время приготовления шлифовальной формы надо по временамъ приставлять къ обрабатываемому отливку соответствующій шаблонъ, чтобы судить, насколько правильно идетъ обтачиваніе. На чертежѣ (фиг. 169) изображенъ шаблонъ *D*, приставленный къ отливку *B*, предназначаему для приготовления шлифовальной формы со сферич. выпуклостью. Шаблонъ нужно приставлять такъ, чтобы его плоскость располагалась по возможности перпендикулярно (не наклонно) къ испытуемой поверхности.



фиг. 170.



фиг. 171.

Если шлифовальныя формы хорошо обточены по шаблонамъ, то будучи сложены вмѣстѣ, онѣ хорошо пристають другъ къ другу своими сферичес. поверхностями (фиг. 170).

Дальнѣйшая обработка сферическихъ поверхностей шлифовальныхъ формъ состоитъ въ томъ, что одну изъ нихъ, напр. форму съ во-

гнутою сферич. поверхностью, навинчиваютъ на цилиндръ *C* (фиг. 169), который не слѣдуетъ выпимать изъ восьмивинтового патрона до тѣхъ поръ, пока шлифовальныя формы не будутъ готовы вполне. Вогнутую сферическую поверхность навинченной формы натираютъ мѣломъ, приводятъ въ медленное вращеніе, и другую (обратную) форму прикладываютъ выпуклою стороною къ первой и двигаютъ ее по поверхности вращающейся формы, какъ бы жемая растереть находящійся на ней порошокъ мѣлу. Движенія приложенной формы должны походить на колебательныя, но должны совершаться по всевозможнымъ диаметрамъ ея. Нажиманіе должно быть значительное. Послѣ нѣкотораго времени, отнявъ приложенную форму отъ вращающейся, мы на послѣдней легко можемъ замѣтить рядъ блестящихъ концентрическихъ колецъ. Эти кольца обнаруживаютъ, что вдоль ихъ поверхность выше, чѣмъ на остальномъ пространствѣ и поэтому мѣлъ былъ стертъ съ этихъ мѣстъ во время скольженія выпуклой формы по поверхности вогнутой. Означенныя кольца надо делкатно сточить при помощи особаго остраго рѣзца (фиг. 171), который легко приготовить изъ плоскаго напильника, отшлифовавъ его одинъ конецъ перпендикулярно широкимъ бокамъ. Устраненіе блестящихъ колецъ можно произвести и вручную, безъ токарнаго станка, просто соскабливая ихъ осторожно подходящимъ рѣзцомъ.

Эту манипуляцію, начинающуюся съ натиранія мѣломъ, повторяютъ нѣсколько разъ до тѣхъ поръ, пока не исчезнутъ упомянутыя кольца и вся поверхность не покажется равномерно блестящею.

Конечно, то же самое предѣлываютъ и со второю формою.

Если послѣдняя работа выполнена удачно, то формы при сложении уже начинаютъ обнаруживать нѣкоторое сцепленіе, которое, понятно, тѣмъ замѣтнѣе, чѣмъ больше шлифовальныя формы.

Затѣмъ наступаетъ шлифованіе формъ. Для этой цѣли прикрѣпляютъ вертикально къ столу особый винтъ, на который навинчиваютъ одну изъ приготовляемыхъ формъ, а другую обратную форму навинчиваютъ на деревянную ручку. Потомъ, увлажняя порошокъ наждаку, прибавляя къ нему воды и, перемѣшивая, доводятъ смѣсь до густоты сливокъ. Эту смѣсь при помощи кисточки наносятъ тонкимъ слоемъ на сферическую поверхность прикрѣпленной къ столу формы, на которую затѣмъ кладутъ другую обратную форму и придерживая послѣднюю за ручку, водятъ ее по поверхности первой, стараясь, какъ бы растереть наждачный порошокъ. Движенія должны походить на круговыя, при чемъ центры описываемыхъ круговъ постоянно должны перемѣщаться менѣе болѣе по окружности. Движенія должны совершаться при умѣренномъ давленіи, равномерно распредѣляющемся по всей поверхности соприкосновенія обѣихъ формъ. Такъ

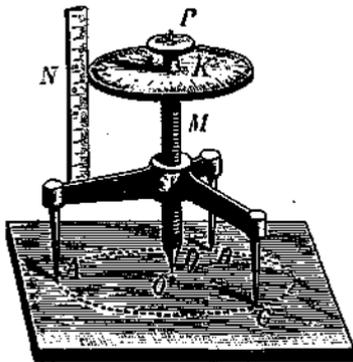
производить шлифованіе формъ вручную. Можно шлифовать формы и на токарномъ станкѣ. Въ послѣднемъ случаѣ одна изъ формъ навинчивается на цилиндръ *C* (фиг. 169) и проводится въ умеренное (не чрезчуръ быстрое) вращеніе, а другая водится вдоль диаметровъ по поверхности верной, смазанной упомянутого смѣсью наждаку съ водою. Время отъ времени слѣдуетъ дозволить и приложенной формѣ нѣсколько поворачиваться. Приложенная форма склонна вертѣться всякій разъ, когда середина ея приближается къ серединѣ формы, вращающейся на токарномъ станкѣ. Это объясняется тѣмъ, что вращающаяся на токарномъ станкѣ форма сильно стремится тогда увлечь и приложенную къ ней обратную форму.

Но наилучше производить шлифованіе формъ на особомъ шлифовальномъ станкѣ, на которомъ шлифуются и линзы и о которомъ мы вскорѣ будемъ говорить. Шлифованіе формъ довольно утомительная работа и отвѣтственная. Она можетъ продолжиться очень долго, смотря потому, насколько удачно была произведена предыдущая обработка формъ. Конечно, продолжительность шлифованія формъ обусловливается и размѣрами ихъ. Во всякомъ случаѣ шлифованіе продолжается до тѣхъ поръ, пока вся поверхность каждой изъ формъ не сдѣлается равномерно-темною. Во время шлифованія надо наблюдать, чтобы порошокъ наждаку былъ достаточно влажнымъ. Въ случаѣ его высыханія надо при помощи кисточки или пипетки пустить на ошлифовываемую поверхность одну или нѣсколько капель воды, или мазнуть эту поверхность влажною кисточкою. Шлифованіе надо производить сначала болѣе крупнымъ наждакомъ, напр. такимъ, котораго зернистость замѣтна простымъ глазомъ; а потомъ, тщательно удаливъ крупный наждакъ, облить формы и вытереть ихъ чистою тряпчочкою, слѣдуетъ нанести на одну изъ ошлифовываемыхъ поверхностей болѣе мелкій наждакъ, увлажненный водою и продолжать шлифованіе дальше. Даже во время шлифованія однимъ и тѣмъ же наждакомъ полезно время отъ времени удалять старый наждакъ и наносить порціи свѣжаго. Наждаку всякій разъ надо брать немного.

Послѣ ошлифовки, формы, будучи сложены вмѣстѣ, обнаруживаютъ замѣтное частичное притяженіе. Уже если діаметръ шлифовальныхъ формъ достигаетъ 10 см., то сдѣленіе можетъ быть столь значительнымъ, что формы трудно подчасъ оторвать другъ отъ друга.

Послѣ шлифовки формъ наступаетъ повѣрка ихъ сферическихъ поверхностей. Повѣрка производится при помощи сферометровъ. Существуютъ равнаго рода сферометры. Опишемъ простѣйшій изъ нихъ. Такой сферометръ изображенъ на чертежѣ (фиг. 172). Онъ держится на трехъ ножкахъ, концы которыхъ *A*, *B* и *C* служатъ вершинами равносторонняго треугольника *ABC*. Остріе *D* микрометри-

ческаго винта M при вращеніи послѣдняго можетъ быть приведено до прикосновенія съ плоскостью треугольника ABC и тогда нижній конецъ его совпадаетъ съ центромъ O окружности, описанной около треугольника ABC . Если окружность круга K раздѣлена на 300 равныхъ частей и если при каждомъ полномъ оборотѣ круга K острие D перемѣщается вдоль оси винта на $\frac{1}{2}$ миллиметра, то при вращеніи круга на одно только дѣленіе окружности острие D перемѣстится



фиг. 172.

всего лишь на $\frac{1}{600}$ миллиметра. При полномъ оборотѣ круга K его плоскость перемѣщается (вверхъ или внизъ) какъ-разъ на одно дѣленіе линейки N . Дѣленія этой линейки и служатъ для счета полныхъ оборотовъ круга K или винта M , а части оборотовъ отсчитываются по дѣленіямъ круга.

Чтобы привести конецъ острия D въ плоскость треугольника ABC , слѣдуетъ поставить сферометръ на зеркальную стеклянную пластинку съ плоскими поверхностями и вращать ^{вращать} до прикосновенія его съ поверхностью пластинки. Если конецъ острия D не доходитъ еще до пластинки, то сферометръ прочно стоитъ на ней, но лишь только конецъ D коснется поверхности пластинки, всякое дальнѣйшее завинчиваніе винта вызоветъ то, что уже не всѣ ножки будутъ касаться пластинки и тогда слегка ударяя сверху пальцемъ поочередно каждую изъ ножекъ сферометра, легко замѣтить нѣкоторый стукъ, проходящій отъ удара поднявшейся ножки о пластинку, при чемъ самъ сферометръ очень легко привести во вращательное движеніе около оси винта, для этого стоитъ только слегка толкнуть одну изъ ножекъ его влево или вправо. Но это вращеніе и постукиваніе ножекъ сейчасъ же можетъ прекратиться, если повернуть винтъ обратно, вывинчивая его. Этимъ обстоятельствомъ пользуются, чтобы привести конецъ острия D какъ-разъ въ ту же плоскость, въ которой располагаются концы острий A , B и C . Если послѣднее уже достигнуто, то отвинтивъ гайку P и не допуская вращенія винта M , свободно располагаютъ кругъ K такъ, чтобы начальное дѣленіе его O приходилось сейчасъ же у ребра линейки N и въ такомъ положеніи кругъ K закрѣпляютъ завинчиваніемъ гайки P . То дѣленіе линейки N , противъ котораго расположился кругъ K во время закрѣпленія его, надо считать начальнымъ.

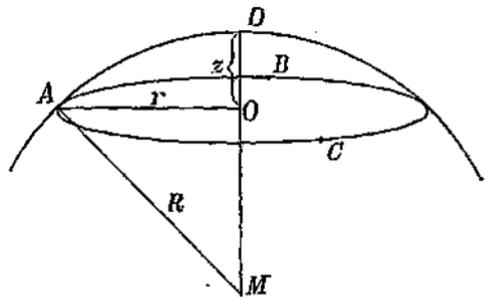
Наилучше, если оно обозначено цифрою 0; тогда дѣленія линейки, расположенныя надъ этимъ дѣленіемъ, можно обозначить положительными числами, а расположенныя подъ нимъ—отрицательными.

Сферометръ имѣетъ разныя примѣненія. Напр. при помощи его можно опред. толщину малаго предмета. При этомъ если достоверно неизвѣстно, представляетъ ли совершенную плоскость та поверхность, на которой стоитъ сферометръ, то поступаютъ такъ. Приподнявъ достаточно винтъ (вывинчивая его), подкладываютъ подъ него испытуемый предметъ и опускаютъ винтъ (завинчивая его) до прикосновенія съ предметомъ, причѣмъ замѣчаютъ показаніе круга K . Затѣмъ, устранивъ предметъ, опускаютъ винтъ дальше до прикосновенія съ поверхностью въ томъ мѣстѣ, гдѣ лежалъ испытуемый предметъ и замѣчаютъ показаніе круга. Разность этихъ двухъ показаній круга дастъ возможность опредѣлить толщину предмета.

Если предметъ — мягкій, то прикрываютъ его стеклянною пластинкою и находятъ общую толщину стеклянн. пластинки и предмета, а потомъ только пластинки. Разность между общою толщиною и толщиною стеклянн. пластинки дастъ толщину предмета.

Теперь покажемъ, какъ при помощи сферометра можно опредѣлить радіусъ сферической поверхности, ограничивающей твердое тѣло.

Вообразимъ себѣ, что нашъ сферометръ поставленъ на шаръ такъ, что нижніе концы ножекъ его A, B и C , а также нижній конецъ D микрометрическаго винта располагаются на поверхности этого шара (фиг. 173). Окружность, проходящая черезъ точки A, B и C , представляетъ собою ничто иное, какъ линію



фиг. 173.

пересѣченія поверхности шара съ плоскостью, проходящею черезъ точки A, B и C . Перпендикуляръ, опущенный изъ центра шара M на плоскость круга ABC , какъ извѣстно изъ геометріи, попадаетъ въ центр O круга ABC . Продолженіе этого перпендикуляра совпадаетъ очевидно, съ осью микр. винта сферометра, такъ какъ она считается перпендикулярною къ той же плоскости круга ABC и проходитъ черезъ центръ его O . Замѣтивъ показаніе круга сферометра, снимаемъ послѣдній съ шара, переносимъ на зеркальную плоскую пластинку и вращая кругъ сферометра, опускаемъ микрометр. винтъ до тѣхъ поръ, пока нижній конецъ его D не коснется поверхности пластинки и замѣчаемъ, сколько полныхъ оборотовъ и частей оборо-

та совершилъ кругъ. Зная это, мы опредѣлимъ пространство, пройденное концомъ D , т. е. опредѣлимъ длину отрѣзка DO . Это очевидно изъ того, что если бы шаръ былъ пронцаемъ для винта, то не снимая сферометра съ шара, можно было бы довести конецъ винта D до плоскости ABC , въ которой располагаются концы ножекъ сферометра, не иначе, какъ понизивъ винтъ (вращеніемъ головки его) на разстояніе DO .

Обозначивъ радіусъ шара черезъ R ,
 „ радіусъ круга ABC черезъ r
 „ и разстояніе DO черезъ z ,

можемъ написать, что

$$DM = DO + OM$$

или

$$R = z + OM.$$

Но изъ прямоуг. треугольника AOM слѣдуетъ, что

$$OM = \sqrt{AM^2 - AO^2}$$

или

$$OM = \sqrt{R^2 - r^2};$$

слѣдовательно

$$R = z + \sqrt{R^2 - r^2} \dots \dots \dots (110 \text{ a})$$

При помощи этого уравненія, зная z и r , можемъ найти R , т. е. радіусъ той сферической поверхности, на которую былъ поставленъ сферометръ.

Если значеніе R громадно въ сравненіи съ значеніемъ r , то послѣднее уравненіе легко можно замѣнить другимъ, очень простымъ уравненіемъ. Въ самомъ дѣлѣ, представимъ послѣднее урав. въ такомъ видѣ:

$$R = z + R \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (111)$$

и разложимъ выраженіе

$$\left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

въ рядъ по возрастающимъ степенямъ числа $\frac{r}{R}$,

тогда получимъ

$$\left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \frac{1}{8} \left(\frac{r}{R} \right)^4 - \dots \dots \dots$$

Въ случаѣ, если $\frac{r}{R}$ ничтожная величина, можемъ принять, что

$$\left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2.$$

При такихъ условіяхъ ур. (111) перепишется такъ

$$R = z + R \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right];$$

или

$$R = z + R - \frac{r^2}{2R},$$

что послѣ упрощенія даетъ:

$$z = \frac{r^2}{2R},$$

откуда

$$R = \frac{r^2}{2z} \dots \dots \dots (112)$$

Последнее уравненіе и служитъ для вычисленія R по заданному r и z , понятно, въ предположеніи, что значеніе R значительная величина въ сравненіи съ r .

Введемъ слѣдующія обозначенія:

- M — число дѣленій въ кругѣ сферометра,
- α — число миллиметровъ, на которое перемѣщается винтъ сферометра при полномъ оборотѣ круга,
- m — число дѣленій круга, на которое надо повернуть послѣдній при нахожденіи z .

Если при полномъ оборотѣ круга винтъ сферометра перемѣщается на α мм., то при вращеніи круга на одно только дѣленіе, винтъ перемѣстится всего на $\frac{\alpha}{M}$ мм., а при вращеніи круга на m дѣленій, винтъ перемѣстится на $\frac{m\alpha}{M}$ мм. Значить, будемъ имѣть

$$z = \frac{m\alpha}{M} \text{ мм.};$$

слѣдовательно

$$R = \frac{Mr^2}{2\alpha} \cdot \frac{1}{m}.$$

Для даннаго сферометра множитель $\frac{Mr^2}{2\alpha}$ есть величина посто-

янная и вычисляется разъ навсегда. Обозначивъ ее черезъ A , будемъ имѣть

$$R = \frac{A}{m},$$

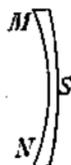
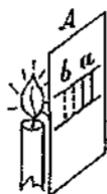
откуда

$$\lg R = \lg A - \lg m.$$

Опредѣливъ разъ навсегда $\lg A$, намъ придется при нахожденіи $\lg R$ опредѣлять только $\lg m$ и вычислять разность $\lg A - \lg m$. По найденному $\lg R$ опредѣлимъ и само R .

Радиусъ r , конечно, можно было бы опредѣлить такъ, что поставивъ сферометръ на стеклянную плоскую пластинку и приведемъ конецъ D микрометрическаго винта (фиг. 172) до прикосновенія съ поверхностью пластинки, поднимаемъ сферометръ вверхъ, кладемъ на пластинку ровную бумагу и, поставивъ на нее сферометръ, прижимаемъ его слегка сверху, благодаря чему на бумагѣ останутся слѣды четырехъ острий A, B, C и D . Тогда уже легко опредѣлить искомый радиусъ r .

Я опредѣлялъ радиусъ r слѣдующимъ образомъ. Въ темной комнатѣ передъ вогнутою линзою S (фиг. 174) поставленъ былъ экранъ A изъ непрозрачной бѣлой бумаги. Въ этомъ экранѣ было сдѣлано отверстіе a , которое освѣщалось пламенемъ свѣчи, поставленной позади (съ лѣвой стороны экрана). Лучи, идущіе изъ щели, отразившись отъ передней поверхности MN линзы S , какъ отъ вогнутого зеркала, давали на томъ же экранѣ изображеніе b отверстія a .



фиг. 174.

Перемѣщая линзу S , можно было достигнуть того, что изображеніе сдѣлалось равнымъ по величинѣ щели a , при чемъ нетрудно было передвиженіемъ той же линзы S расположить это изображеніе около самого отверстія a для болѣе легкаго сравненія размѣровъ щели a и самого изображенія b . Изъ физики извѣстно, что если предметъ находится въ центрѣ вогнутого зеркала, то изображеніе его равно по величинѣ предмету и находится въ той же плоскости, что и предметъ; слѣдовательно послѣ указанной установки оставалось измѣрить разстояніе отъ щели a до поверхности MN , чтобы опредѣлить радиусъ этой поверхности. Этотъ радиусъ можно было опредѣлить непосредственнымъ измѣреніемъ съ точностью до 1 мм. Затѣмъ, поставивъ сферометръ на ту же поверхность MN , можно было найти величину s , входящую въ ур. (112). Такимъ образомъ въ этомъ уравненіи было извѣстно s и R , а слѣдовательно можно было найти и r .

Въ моемъ опытѣ R , т. е. радіусъ сфер. поверх. MN , былъ равенъ 445 мм., а r оказалось равнымъ 20,05 мм.; слѣдовательно было основаніе пользоваться упрощенною формулою (112).

Величину, на которую перемѣщается микрометрической винтъ сферометра при полномъ оборотѣ круга, можно безъ труда опредѣлить, если имѣется подъ рукою пластинка, толщина которой достоверно извѣстна. Ту же величину, т. е. высоту винтового хода, можно опредѣлить при помощи компаратора. Наконецъ, высоту винтового хода можно опредѣлить просто такимъ образомъ. Надо отдѣлить микрометрической винтъ отъ треножника сферометра, вывинтивъ его (винтъ) совсѣмъ. Затѣмъ, слѣдуетъ приложить къ нему линейку, раздѣленную на миллиметры и посмотрѣть, сколько витковъ винта помѣщается на протяженіи, напр. 20 мм. Положимъ, что на протяженіи 20 мм. помѣщается n витковъ. Тогда одинъ витокъ занимаетъ $\frac{20}{n}$ мм., что приблизительно и представило бы въ данномъ случаѣ высоту винтового хода.

Въ сферометрѣ, устроенномъ мною, 97 витковъ винта занимали протяженіе въ 50 мм.; поэтому высоту винтового хода означеннаго винта можно было принять равною $h = \frac{50}{97}$ мм. = 0,515 мм.

Положимъ, что я ошибся въ счетѣ миллиметровъ на 0,5 мм. и взялъ 50 мм. вмѣсто надлежащаго числа 50,5 мм. Тогда истинное значеніе h выразилось бы такъ:

$$h = \frac{50 + 0,5}{97} \text{ мм.} = \frac{50}{97} \text{ мм.} + \frac{0,5}{97} \text{ мм.},$$

т. е. истинное h отличалось бы отъ найденнаго мною только на $\frac{1}{194}$ мм.

Надо замѣтить, что измѣненіе температуры вліяетъ на показанія сферометра.

Сферометръ надо оберегать отъ спланныхъ толчковъ, отъ которыхъ онъ можетъ легко испортиться.

При помощи сферометра проверяютъ сферическую поверхность шлифовальной формы послѣ ея ошлифовки наждакомъ, т. е. находятъ радіусъ этой поверхности. Если этотъ радіусъ только немного отличается отъ того радіуса, какой должна имѣть испытываемая поверхность формы, то поправку можно произвести при помощи наждачной шкурки. Наждачная шкурка—это листъ бумаги или полотна, равномерно покрытый наждакомъ. Такіе листы можно получить въ магазинѣ металлическихъ издѣлій. Номера, выставленные на листахъ, указываютъ на степень мелкозернистости наждаку.

Если бы оказалось необходимымъ, напр. немного уменьшить радиусы формъ, то пришлось бы у вогнутой формы шлифовать главнымъ образомъ середину поверхности, а у выпуклой — наоборотъ: главнымъ образомъ мѣста, расположенныя у краевъ, причемъ слѣдуетъ время отъ времени проверять сферометромъ, достаточно ли исправлены обѣ формы. Если при помощи наждачной шкурки поправка формъ достаточно выполнена, то слѣдуетъ закончить эту работу вторичною шлифовкою обѣихъ формъ другъ о друга при посредствѣ увлажненнаго мелкаго наждаку.

Вообще при изготовленіи большихъ формъ слѣдуетъ вести дѣло такъ, чтобы не приходилось производить значительныхъ поправокъ уже послѣ ошлифовки формъ увлажненнымъ наждакомъ. Поэтому полезно примѣнять сферометръ еще и до шлифовки формъ, когда онѣ еще обтачиваются окончательно на токарномъ станкѣ.

Если готовятъ формы съ плоскими поверхностями, то необходимо стараться, чтобы уже на токарномъ станкѣ онѣ были обточены аккуратно и имѣли по возможности плоскую поверхность. Хорошій токарный станокъ даетъ возможность достигнуть этого, если въ немъ можно установить супортъ такъ, чтобы зажатый въ немъ рѣзецъ способенъ былъ двигаться перпендикулярно къ оси вращенія обтачиваемаго предмета. Последняя стружка, снимаемая рѣзцомъ, должна быть очень незначительною.

Приготовленіе небольшихъ шлифовальныхъ формъ, съ короткими радиусами, напр. въ 3 сантиметра, сравнительно не представляетъ большого труда. Тогда ограничиваются аккуратно изготовленными шаблонами, не прибѣгая къ примѣненію сферометра.

О приготовленіи шлифовальныхъ формъ для весьма малыхъ линзъ, входящихъ въ составъ микроскопическихъ объективовъ, будемъ говорить послѣ.

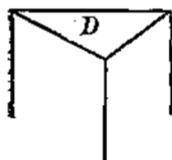
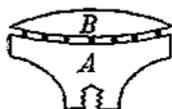
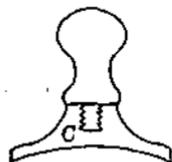
§ 101. Шлифованіе линзъ. Когда шлифовальныя формы уже готовы, приступаютъ къ шлифованію линзъ. При этомъ шлифуемое стекло надо прикрѣпить къ чему нибудь такому, за что можно было бы придерживать это стекло во время его шлифованія. Если стекло небольшое, то обыкновенно его приклеиваютъ къ деревянной ручкѣ такъ. Берутъ твердую черную смолу (варъ), расплавляютъ ее при умѣренномъ нагреваніи до того, чтобы она сдѣлалась удобоподвижною, какъ вода. Въ то же время медленно и осторожно подогреваютъ стекло. Обмакиваютъ одинъ конецъ ручки въ расплавленную смолу и, не давая ей времени застыть, быстро прижимаютъ къ ней нагрѣтое стекло. Стекло слѣдуетъ расположить на ручкѣ симметрично и оставить такъ, пока смола не отвердѣетъ. Если бы потомъ понадобилось снять стекло съ ручки, то опять подогреваютъ стекло со смо-

люю постепенно и осторожно и когда смола успеет нагрѣться, оно безъ труда стаскивается съ ручки. Впрочемъ, если стекло достаточно толстое, то можно его отдѣлать отъ ручки, вдавливая остріе тонкаго ножа въ слой смолы, находящійся между стекломъ и деревомъ ручки. На чертежѣ (фиг. 175) изображена ручка съ прикрѣпленнымъ къ ней стекломъ *S*. Длина ручки бываетъ примѣрно 6—7 сантим.

Но если нужно шлифовать тонкую и вмѣстѣ съ тѣмъ большую линзу, діаметръ которой, напр. 10 сантим., то надо поступать иначе. Надо приготовить хотя бы изъ чугуна держатель, напоминающій по виду шлифовальную форму, но отличающійся отъ послѣдней менше аккуратною отдѣлкою той поверхности, къ которой имѣетъ быть прикрѣплено стекло. Эту поверхность достаточно аккуратно обточить на токарномъ станкѣ по соответствующему шаблону, при чемъ если приклеиваемая поверхность стекла сферически выпуклая, то поверхность держателя должна быть сферически вогнутою и кривизна обѣихъ соединяемыхъ поверхностей должна быть приблизительно одинаковою. Толщина тарелки держателя, а особенно шлифовальной формы, должна быть достаточною, чтобы тарелка вплуть не гнулась. Обыкновенно толщина тарелки составляетъ $\frac{1}{10}$ діаметра ея. Готовый держатель *A*



фиг. 175



фиг. 176.

(фиг. 176) располагается горизонтально на треножничѣ *D*, изображенномъ на чертежѣ отдѣльно, и нагрѣвается снизу медленно и равномерно. Въ то же время расплавляется смола до такой степени, чтобы съ палочки, погруженной въ нее и затѣмъ вынутой, падали капли безъ всякихъ тянущихся застывающихъ на воздухѣ нитокъ. Придвигаютъ къ держателю сосудъ со смолою, берутъ палочку въ родѣ спички и наносятъ ею на поверхность держателя капли смолы, располагая ихъ симметрично по concentрическимъ окружностямъ, въ разстояніи, равномъ примѣрно 1 сантиметру. Затѣмъ кладутъ на эти капли равномерно нагрѣтое стекло и прикрывъ его какою нибудь матеріею, напр. сукномъ, опять равномерно нагрѣ-

ваютъ держатель до тѣхъ поръ, пока капли не станутъ плавиться (равмягчаться). Тогда и стекло успеетъ прильнуть къ каплямъ. Надо наблюдать, чтобы оно расположилось на держателѣ симметрично. Его можно слегка прижать къ держателю, но никакъ не пальцами, а подогрѣтою соответствующею формою *C* (фиг. 176), причѣмъ поверхность формы во время прижиманія должна равномерно прилегать

къ поверхности стекла. Во время прижиманія стекла къ держателю капли нѣсколько сплющиваются. Но совѣтъ вѣтъ надобности, чтобы капли сливались одна съ другою. Это даже не желательно. Такимъ образомъ между стекломъ и держателемъ, въ промежуткахъ между каплями, будетъ пространство, занятое воздухомъ. Чтобы это пространство не засорилось смѣсью наждака съ водою во время шлифованія стекла, я послѣ того, какъ держатель со стекломъ совѣмъ остылъ, замазывалъ щели по крамъ стекла, вдавливая въ нихъ нагрѣтый (мягкій) сплавъ воска и канффоли, а затѣмъ снаружи осторожно приглаживалъ эту массу нагрѣтою проволокою, чтобы она (масса) нигдѣ не была шероховатою.

Если стекло достаточно толстое, то діаметръ держателя можетъ быть значительно меньше діаметра стекла и тогда замазываніе щелей является совершенно лишнимъ.

Если нужно отдѣлать стекло отъ держателя, то надо опять нагрѣть послѣдній до такой степени, чтобы можно было легко стянуть съ него стекло.

Мнѣ всегда удавалось спять стекло безъ предварительнаго нагрѣванія. Для этой цѣли я вставлялъ коленъ очень тонкаго (0,4 мм. толщ.) ножа между стекло и держатель, направляя остріе въ массу ближайшей капли такъ, чтобы остріе скользило по поверхности держателя. Происходилъ трескъ отъ раскалывающейся смолы, я производилъ ту же манипуляцію въ другомъ мѣстѣ, пока стекло не отдѣлилось совѣмъ.

Конечно, можно прикрѣплять стекло и къ шлифовальной формѣ, если только послѣдняя остается лишнею во время работы.

Различаютъ три способа шлифованія линзъ:

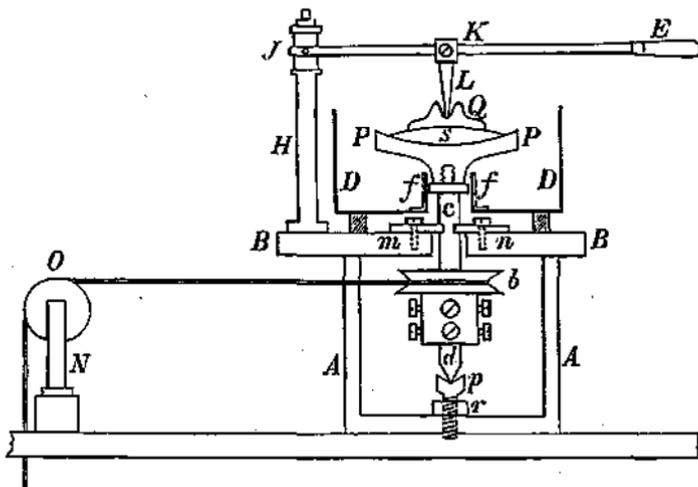
- 1) вручную,
- 2) на шлифовальномъ станкѣ
- и 3) по радіусу (фраунгоферовскій способъ).

Шлифованіе линзъ вручную производится на шлифовальной формѣ, прикрѣпленной къ прочно стоящему столу. Оно ведется подобно тому, какъ и шлифованіе вручную формъ, о чемъ мы уже говорили и указывали родъ движеній во время шлифованія. На родъ движеній надо обращать вниманіе, такъ какъ родъ движеній вліяетъ на правильность сферической поверхности. Сущность правильнаго движенія во время шлифованія линзъ вообще состоитъ въ томъ, чтобы сферическія поверхности шлифовались по всему своему пространству равномерно, съ одинаковою скоростью.

Этотъ способъ „шлифованіе вручную“ утомителенъ и можетъ примѣняться при изготовленіи малыхъ линзъ; поэтому теперь онъ почти вездѣ оставленъ.

Третій способъ „по радіусу“ состоитъ въ томъ, что стержень, котораго длину по желанію можно измѣнять, подвѣшивается на шаровомъ шарнирѣ такъ, что нижній конецъ способенъ при качаніи описывать сферическую поверхность. Къ этому то концу прикрѣпляется стекло, а подъ стекло до соприкосновенія съ нимъ подставляется горизонтально шлифовальная форма, въ которой и шлифуется стекло покачиваніемъ стержня по всевозможнымъ направленіямъ. Полагаютъ, что самое точное приготовленіе линзъ достигается этимъ способомъ. Но этотъ способъ сопряженъ съ большими техническими затрудненіями.

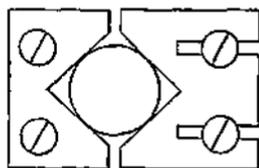
При надлежащей аккуратности и осмотрительности можно достигнуть хорошихъ результатовъ и при второмъ способѣ, т. е. производя шлифованіе на станкѣ. Этотъ способъ теперь очень распространенъ. Шлифовальные станки существуютъ въ продажѣ. Они довольно дорогіе. Я приготовилъ себѣ шлифовальный станокъ слѣдующимъ образомъ. Взять былъ столъ отъ ножной швейной машины. Его доска была прикрѣплена на столько высоко, чтобы можно было



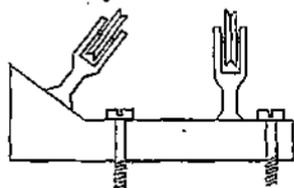
фиг. 177.

вести шлифованіе стоя. Маховое колесо (неизображенное на чертежѣ) обложено было свинцовымъ кольцомъ, дабы придать этому колесу большую стремительность вращаться. На столѣ утверждалась металлическая часть *АА* (фиг. 177), къ которой сверху привинчивалась доска *ВВ* съ отверстіемъ. Черезъ отверстіе проходила вертикальная стальная ось *cd*. Двѣ пластинки *m* и *n*, привинченныя къ доскѣ *ВВ*, обхватывали шейку оси *cd* съ обѣихъ сторонъ и не позволяли ей колебаться. Форма пластинокъ съ поперечнымъ сѣченіемъ оси показана отдѣльно на чертежѣ (фиг. 178). Закаленный нижній конецъ верти-

кальной оси *cd* (фиг. 177) опирался въ коническое углубленіе стального вѣнта *p*, который при помощи гайки *r* могъ быть закрѣпленъ неподвижно на желаемой высотѣ. На доску *BB* ставился эллиптический ящикъ *DD* изъ цинкового листа. Высота стѣнокъ ящика достигала 9 сантиметровъ. Въ днѣ ящика было сдѣлано отверстіе,



фиг. 178.



фиг. 179.

къ краямъ котораго была припаяна сквозная трубка *ff*. Черезъ эту трубку проходилъ верхній конецъ оси *cd*. Верхній конецъ *c* такъ былъ приспособленъ, что на него можно было навинчивать или шлифовальную форму, или держатель со стекломъ. На оси *cd*, менѣе болѣе по серединѣ ея, находился блокъ *b*, привинченный къ оси восьмью винтами. Около ящика *DD* былъ прикрѣпленъ къ доскѣ *BB* стержень *H*. На верхній обточенный конецъ стержня *H* насаживалась особая муфта, съ которою шарнирно соединялся четырехгранный рычагъ *JE*. Чтобы воспрепятствовать муфтѣ сдвигаться со стержня, сверху еще навинчивалась гайка съ подложенною шайбою. Такимъ образомъ ручка рычага *E* могла двигаться со стержнемъ горизонтально и вертикально. На рычагѣ *JE* закрѣплялась часть *K* съ коническимъ остриемъ *L*. Влѣво отъ металлической части *AA* прикрѣплялась деревянная часть *N*, въ которую были зашпичены два блока *O*. Эта часть *N* изображена отдѣльно на чертежѣ (фиг. 179), гдѣ видно расположеніе блоковъ. Безконечный ремень, обхватывающій маховое колесо, шелъ вверхъ черезъ отверстіе доски стола, отгибалъ одинъ изъ блоковъ *O* (фиг. 177), направлялся горизонтально по *Ob* вправо, обхватывалъ блокъ *b*, поворачивалъ назадъ влѣво, отгибалъ второй изъ блоковъ *O* и направлялся внизъ къ маховому колесу. Дѣйствіемъ ноги на педаль маховое колесо приводилось въ движеніе, а колесо скоро маховое колесо приходило въ движеніе, тотчасъ-же двигался безконечный ремень, который своимъ движеніемъ заставлялъ вращаться и блокъ *b*, а слѣдовательно и вертикальную ось *cd* вмѣстѣ съ привинченною къ ней шлифовальною формою.

Если нужно шлифовать довольно большое стекло (10 сант. въ діам.), то работа производится слѣдующимъ образомъ. Навинчиваютъ на вертикальную ось *cd*, шлифовальную форму *PP*, покрываютъ сферическую поверхность ея тонкимъ слоемъ наждаку, увлажнен-

наго водою и на эту поверхность кладутъ стекло S , къ которому предварительно прикрѣпляется смолою металлическій держатель Q съ коническимъ углубленіемъ. Держатель Q прикрѣпляется такъ, чтобы его коническое углубленіе располагалось противъ середины стекла, что достигается при помощи циркуля. Въ углубленіе держателя вставляется нижній конецъ стального стержня L , прикрѣпленнаго къ рычагу JE . Затѣмъ, захвативъ рукою ручку E рычага JE и приведи вертикальную ось съ формою PP во вращеніе, двигаютъ его то въ одну то въ другую сторону, умѣренно прижимая стекло къ шлифовальной формѣ. При этомъ стекло получаетъ качательное и вращательное движеніе. Скорость вращенія стекла можно по желанію ослабить, касаясь поверхности держателя Q пальцами. Прикосновеніе слѣдуетъ производить поближе къ серединѣ держателя, располагая два пальца симметрично на поверхности его.

Надавливаніе руки на рычагъ считаютъ выгоднымъ замѣнять цирквою, прикрѣпляемою къ рычагу JE . Тогда остается только водить рычагъ то въ ту, то въ другую сторону, не надавливая на него.

Разбрасываемый при вращеніи наждакъ ударяется о стѣнки ящичка DD (фиг. 177) и падаетъ на дно того же ящичка.

Когда мнѣ приходилось шлифовать очень тонкія линзы, діаметръ которыхъ былъ нѣсколько больше 10 сантим., то я прикрѣплялъ стекло къ держателю, діаметръ котораго равнялся діаметру линзы, какъ показано на чертежѣ (фиг. 176). При этомъ шлифованіе производилось такъ. На вертикальную ось навинчивалась не шлифовальная форма, а упомянутый держатель съ прикрѣпленнымъ къ нему стекломъ. Стекло покрывалось тонкимъ слоемъ увлажненнаго наждаку и на его поверхность клалась шлифовальная форма, которая и водилась по поверхности не слишкомъ быстро вращающагося стекла. Діаметръ шлифовальной формы былъ нѣсколько меньше діаметра стекла. Форма приводилась въ движеніе или при помощи рычага JE или непосредственно рукою. Въ послѣднемъ случаѣ къ ней (формѣ) привинчивалась коротенькая ручка. О такомъ методѣ шлифованія упоминается въ сочиненіи Майзеля. *)

Небольшія стекла шлифуются такъ, что шлифовальная форма, покрытая увлажненнымъ наждакомъ, вращается на оси cd , а стекло, прикрѣпленное къ деревянной ручкѣ, водится рукою по поверхности вращающейся формы вдоль діаметровъ ея при умѣренномъ давленіи. Само стекло тоже должно по временамъ поворачиваться (вращаться).

*) Lehrbuch der Optik. F. Meisel. Weimar, 1889.

Замѣтимъ, что если-бы мы расположили стекло по серединѣ шлифовальной формы и такъ держали бы его неподвижно въ то время, какъ форма вертелась бы, то попятно шлифованіе было бы неправильное, такъ какъ шлифованіе происходило бы быстрѣе всего по краямъ стекла, т. е. тамъ, гдѣ стекло касалось бы точекъ формы, имѣющихъ наибольшую скорость; тогда какъ середина стекла совсѣмъ не шлифовалась бы или очень мало, и въ результатѣ шлифуемая поверхность стекла вышла бы совсѣмъ не сферическою. Вотъ почему надо покачивать стекло по поверхности формы. Благодаря такому движенію, середина стекла во первыхъ приходитъ въ движеніе по поверхности шлифовальной чашки, а во вторыхъ середина стекла при-двигается къ крайнимъ точкамъ вращающейся формы, т. е. къ тѣмъ мѣстамъ, которыя способны быстрѣе всего шлифовать.

При покачиваніи стекла необходимо надо заботиться, чтобы поверхность стекла по всему своему пространству равномерно прижималась къ формѣ.

Линзы шлифуются сначала крупнымъ наждакомъ или даже пескомъ, при чемъ допускается быстрое движеніе. Для шлифованія линзъ крупнымъ наждакомъ полезно имѣть особія шлифовальныя формы, хотя бы даже неполнѣ точныя. Полезно это потому, что во первыхъ при шлифованіи крупнымъ наждакомъ поверхности формъ быстро измѣняются, а во вторыхъ нѣкоторыя зерна крупнаго наждаку могутъ вонзиться въ вещество формы и тамъ застрять. Потомъ, во время шлифованія мелкимъ наждакомъ, эти зерна могутъ опять выкатываться изъ вещества формы и, сдѣлавшись свободными, могутъ производить черезчуръ грубые слѣды, борозды и царапая поверхность, которая уже успѣла принять болѣе совершенный гладкій видъ при шлифованіи мелкимъ наждакомъ. Практика показываетъ, что одно крупное зерно среди остальныхъ мелкихъ при шлифованіи дѣлаетъ углубленія болѣе значительныя, чѣмъ въ случаѣ, когда всѣ зерна менѣе-болѣе одинаково крупныя.

Послѣ шлифованія крупнымъ наждакомъ очищаютъ отъ него шлифующіе и шлифуемые предметы и примѣняютъ наждакъ болѣе мелкій. Закончивъ съ нимъ шлифованіе, замѣняютъ его еще болѣе мелкимъ и т. д., пока не дойдутъ до самаго мелкаго, какъ пыль.

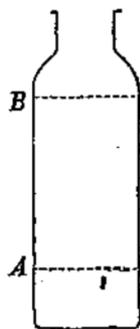
Одинъ сортъ наждаку можно замѣнить другимъ лишь послѣ того, какъ употребляемый наждакъ успѣлъ вполне устранить слѣды предыдущаго — болѣе крупнаго наждаку.

Шлифованіе даже небольшихъ линзъ продолжается нѣсколько часовъ, а большія линзы шлифуются очень долго.

Въ продажѣ есть разные сорта наждаку. Степень мелкозернистости (измельченности) наждаку обозначается номерами. *)

Каждый сортъ наждаку долженъ представлять однородный порошокъ, безъ случайныхъ излишне крупныхъ зеренъ.

Крупные сорта получаютъ просѣиваніемъ черезъ разные сита, а болѣе мелкіе — путемъ отмучиванія. Отмучиваніе можно производить слѣдующимъ образомъ. Ставятъ нѣсколько чистыхъ банокъ (наилучше такой формы, какъ показано на чертѣжѣ (фиг. 180). Наливаютъ въ первую банку воды, напр. до черты *B* и всыпаютъ мелкаго (какъ пыль) наждаку, напр. до черты *A*. Затѣмъ, все сильно взбалтываютъ и ставятъ банку на мѣсто. Черезъ опредѣленный промежутокъ времени, напр. черезъ 5 минутъ, когда болѣе крупныя частицы наждаку осядутъ, осторожно сливаютъ половину верхняго слоя мутной жидкости въ другую банку, а въ первую доливаютъ воды до прежней высоты и повторяютъ съ первою банкою прежнее дѣйствіе. Когда и вторая банка почти наполнится, взбалтываютъ содержимое въ ней и ставятъ ее на прежнее мѣсто. Черезъ 5 минутъ сливаютъ половину верхняго слоя жидкости изъ второй банки въ третью и т. д. Такимъ образомъ во второй банкѣ получится наждакъ болѣе мелкій, чѣмъ въ первой, въ третьей — еще мельче и т. д., а въ послѣдней банкѣ осядетъ самый мелкій наждакъ. Во время этой манипуляціи банки слѣдуетъ прикрывать чѣмъ нибудь, напр. бумагою.



фиг. 180.

Самый мелкій наждакъ надо хранить въ закупоренной банкѣ, чтобы въ него не попала пыль. Въ пыли носятя песчинки, которыя могутъ быть гораздо крупнѣе частицъ самаго мелкаго наждаку. Такія песчинки, попавъ въ мелкій наждакъ, положительно портятъ работу во время шлифованія. Вообще, когда шлифованіе идетъ уже

*) Минераль наждакъ (смѣт, Schmirgel) наилучшаго качества получается съ острова Наксоса. Онъ добывается тамъ въ большихъ кускахъ. Эти куски разбиваются на мелкіе, а мелкіе въ свою очередь раздробляются при помощи особой машины. Измельченный наждакъ просѣивается черезъ сита съ отверстіями разной величины. Такимъ образомъ получаютъ крупные сорта наждаку. По англійскому обозначенію номеръ, характеризующій сортъ крупнаго наждаку, выражаетъ число квадратныхъ отверстій соответствующаго сорту сита на протяженіи линейнаго дюйма. Въ Германіи иное обозначеніе.

Ниже показаны существующіе номера крупнаго наждаку, причежъ въ первой строкѣ обозначеніе англійское, а во второй нѣмецкое.

Англ. № 6 10 16 20 24 30 36 40 48 60 70 80 90 100 0 00 000 0000
Нѣм. № 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0 00 000 0000

на самомъ мелкомъ наждакѣ, надо вести дѣло очень аккуратно и осторожно. Движеніе должно быть медленное, давленіе — слабое. Последнюю порцію, нанесенную на поверхность шлифующей формы, полезно держать подольше; надо только по временамъ прибавлять достаточное количество воды. Но стекло и форма не должны обнажаться, т. е. оставаться безъ наждаку. Онъ долженъ равномерно покрывать ихъ поверхностямъ тончайшимъ слоемъ.

Какъ бы ни казался намъ самый мелкій наждакъ хорошимъ все-таки не мѣшаетъ всякій разъ передъ самымъ употребленіемъ тщательно растереть его на зеркальномъ стеклѣ кусочкомъ зеркальнаго же стекла или же донышкомъ небольшого стакана, если оно отшлифовано снизу на плоскость. Во время растиранія надо увлажнять порошокъ, цуская на него по каплямъ воду до тѣхъ поръ, пока смѣсь не будетъ доведена до густоты сливокъ.

Если предполагають, что шлифованіе уже достаточно, то, обмывъ стекло, обтирають его чистою льняною тряпочкою и тщательно разсматривають его поверхность при помощи хорошей лупы, при чемъ наблюдаютъ, нѣтъ ли на ошлифованной поверхности стекла какихъ нибудь ячеекъ или царапинъ. Въ случаѣ присутствія таковыхъ надо шлифовать опять и то полезно начинать дальнѣйшее шлифованіе не съ самаго мелкаго наждаку, а съ болѣе крупнаго, смотря по глубинѣ замѣчяемыхъ царапинъ.

Ошлифовавъ первую поверхность, отдѣляютъ стекло отъ ручки и прикрѣпивъ его къ ней ошлифованною стороною, шлифуютъ другую поверхность на соответствующей формѣ.

Когда шлифуютъ на точныхъ формахъ, то чтобы не допустить порчи ихъ сферическихъ поверхностей, производятъ время-от-времени поправку ихъ такимъ образомъ, что черезъ каждыя 10 минутъ шлифованія снимають стекло съ формы, кладутъ его въ сторонѣ,

Пыль, которая образуется при просѣиваніи наждаку, отгоняется сильнымъ вентиляторомъ въ сторону и собирается въ особомъ ящикѣ. Эта то пыль и служитъ для приготовления мелкихъ сортовъ наждаку путемъ отмучиванія. Номеръ, выставленный на отмученномъ наждакѣ, показываетъ число минутъ, по истеченіи которыхъ наждакъ осѣлъ. Существуютъ слѣдующіе номера мелкаго наждаку:

3м. 5 м. 10 м. 15 м. 20 м. 30 м. 40 м. 60 м.

Употребляются еще такія обозначенія:

Названіе *№ 00 000 0000 00000*

Осѣдаетъ послѣ 2м. 6м. 10м. 15м.

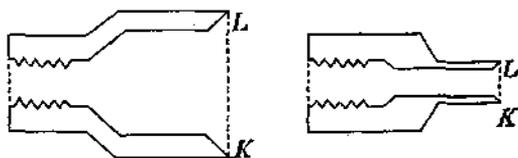
Шлифованіе оптическихъ стеколъ обыкновенно заканчивается номеромъ 40 м, причѣмъ вся поверхность стекла должна сдѣлаться равномерно черною.

беруть обратную форму и шлифуютъ объёмы формы другъ о друга. Достаточно, если это шлифование продолжится 2 — 3 минуты.

Послѣ очень продолжительнаго шлифования слѣдуетъ проконтролировать поверхности шлифовальныхъ формъ сферометромъ.

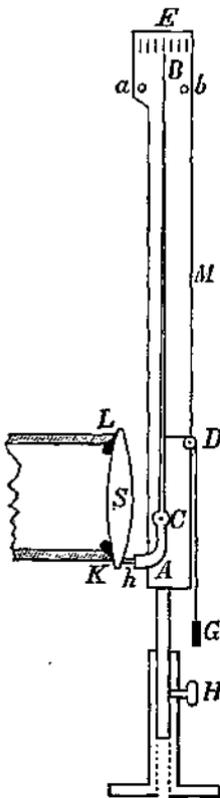
Ошлифованная съ обѣихъ сторонъ линза подвергается изслѣдованію при помощи сферометра или шаблоновъ.

§ 102. **Центрированіе линзъ.** Большія линзы уже сейчасъ же послѣ ошлифовки центрируются. Центрировать линзу значитъ ошлифовать края ея по окружности, центръ которой долженъ лежать на оптической оси линзы. Центрированіе линзъ производится слѣдующимъ образомъ. На токарномъ станкѣ готовится особый латунный патронъ. На чертежѣ (фиг. 181) изображенъ видъ (но не размеры) такого патрона — направо для центрированія большихъ линзъ, а направо для центрированія малыхъ линзъ. Одинъ конецъ (на чертежѣ — лѣвый) патрона имѣетъ винтовую нарезку для навинчивания его на шпиндель токарнаго станка, а другой конецъ представляетъ полый цилиндръ съ толстыми стѣнками. Края стѣнки KL должны быть обточены наклонно къ оси патрона. Навинтивъ такой патронъ на шпиндель токарнаго станка, приводятъ его во вращеніе и подогреваютъ пламенемъ спиртовой лампочки или газовой горѣлки. Когда патронъ достаточно нагрѣется, приставляютъ къ краямъ KL кусочекъ смолы. Смола плавится и обливаетъ края KL . Тогда пламя удаляютъ и немедленно прикладываютъ къ краямъ KL линзу, заботясь, чтобы она вплотную пристала къ краямъ KL . Затѣмъ, придвигаютъ къ линзѣ приборчикъ (фиг. 182) съ чувствительнымъ рычагомъ ACB такъ, чтобы конецъ короткаго плеча A касался линзы поближе къ краю ея. Со шкива (§ 97) снимаютъ безконечный ремень и вращаютъ шкивъ рукою, въ слѣдствіе чего станетъ вращаться и патронъ съ линзою. Если линза правильно прикреплена къ патрону, т. е. если оптическая ось ея совпадаетъ съ осью вращенія, то при вращеніи конецъ B длиннаго плеча CB ломаннаго рычага ACB будетъ оставаться неподвижнымъ, въ противномъ же случаѣ этотъ конецъ при каждомъ полномъ оборотѣ линзы будетъ периодически перемѣщаться то вправо, то влѣво по небольшой шкалѣ E съ дѣленіями. Руководствуясь этими перемѣщеніями длиннаго плеча рычага, передвигаютъ линзу на неостывшемъ еще патронѣ до тѣхъ поръ, пока при вращеніи линзы длинное плечо не будетъ оставаться неподвижнымъ. Плечо CB должно быть значительно длиннѣе плеча AC (напр. въ 50 разъ).



фиг. 181.

Къ длинному плечу *CB* прикреплена нитка, огибающая маленький блокъ *D* и оканчивающаяся маленькою гирькою *G*, которая стремится отклонить длинное плечо *CB* вправо. Короткое плечо оканчивается



фиг. 182.

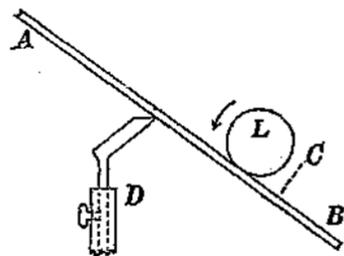
крѣпко вставленнымъ въ него крошечнымъ костянымъ цилиндркомъ *h* съ плоскимъ основаніемъ. Къ поверхности линзы прикасаются именно края этого основанія. Приборчикъ съ рычагомъ такъ устроенъ, что, ослабивъ винтъ *H*, можно поднять или опустить верхнюю часть и тѣмъ же винтомъ закрѣпить ее на произвольной высотѣ. Такимъ образомъ костяной цилиндрикъ *h* можетъ быть установленъ на желаемой высотѣ. По краямъ дѣлений дуги *E* находятся два стерженька *a* и *b*, не позволяющіе длинному плечу *CB* падать. Ось вращенія рычага въ *C*. Нѣкоторые мастера предпочитаютъ располагать пластинку *M*, на которой держится рычагъ, не вертикально, какъ показано на чертежѣ (фиг. 182), а горизонтально.

Необходимо замѣтить, что раньше, чѣмъ приклеивать стекло, нужно провѣрить, правильно ли отточены края *KL* у самого патрона (фиг. 181). Такая повѣрка достигается при помощи того же чувствительнаго рычага, который употребляется при центрированіи линзъ (фиг. 182).

Когда установка линзы окончена, берутъ пластинку изъ мѣди или цинка или желѣза приблизительно въ дюймъ шириною и 10 дюймовъ

длиною, наносятъ на нее небольшую порцію увлажненнаго наждаку, опираютъ о подручникъ *D*, какъ показано на чертежѣ (фиг. 183)

и нижній конецъ ея осторожно доводятъ до прикосновенія съ краями линзы *L*, которая въ это время должна быстро вращаться. Доведя пластинку до прикосновенія съ вращающеюся линзою, надо немедленно остановить ее (пластинку) въ такомъ положеніи, придерживая верхній конецъ ея *A* и никакъ не надавливая ею насильно на линзу. Если края линзы не концентричны съ осью вращенія, то во время вращенія происходитъ періодически шумъ отъ тренія болѣе выдающихся краевъ линзы о пластинку *AB*. Эти края



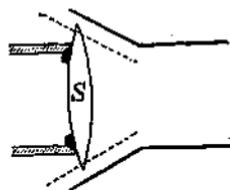
фиг. 183.

во время вращенія происходитъ періодически шумъ отъ тренія болѣе выдающихся краевъ линзы о пластинку *AB*. Эти края

раньше всего шлифуются и по истечении некоторого времени шлифования периодически повторяющийся шумъ, происходящий при вращении линзы, переходитъ въ равномерный и непрерывный — безъ периодическихъ усиливаний и ослаблений. Тогда можно быть увѣреннымъ, что края линзы представляютъ окружность съ центромъ на оси вращения, а следовательно и на оптической оси самой линзы, такъ какъ эта ось была приведена при помощи чувствительнаго ломаннаго рычага въ совпаденіе съ осью вращения токарнаго станка.

Наждакъ долженъ примѣняться достаточно мелкій (примѣрно № 3 м.) и новыя порціи его должны наноситься на пластинку *AB* почаще. При этомъ, когда одною рукою придерживается верхній конецъ пластинки *AB*, другою рукою по временамъ представляютъ неподалеку отъ вертящейся линзы пластинку *C*, чтобы задержать на некоторое время скользящій и скатывающійся внизъ наждакъ.

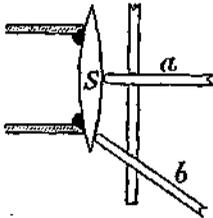
Послѣ центрировки тою же пластинкою *AB* сошлифовываютъ острые кантики краевъ линзы, если въ этомъ есть надобность. При этой работѣ пластинка *AB* удерживается въ положеніи, замѣтно наклонномъ къ поверхности линзы. Эти кантики можно сошлифовать еще и при помощи цинковой или мѣдной трубки съ коническимъ расширеніемъ (фиг. 184). Внутренняя поверхность коническаго расширенія покрывается увлажненнымъ наждакомъ и приставляется къ вращающейся линзѣ *S*, благодаря чему острые кантики сошлифовываются наклонно оси вращения. Такой способъ удобенъ при массовомъ изготовленіи линзъ, когда желаютъ, чтобы всѣ линзы были однообразно приготовлены.



фиг. 184.

Если линза уже отполирована, то можно произвести центрирование ея безъ помощи чувствительнаго рычага, ограничиваясь наблюдениемъ тѣхъ изображеній свѣтлаго предмета, которыя получаются въ слѣдствіе отраженія свѣта отъ обѣихъ полированныхъ поверхностей линзы. Эти изображенія могутъ получаться или отъ окна или отъ зажженной свѣчи. Одно изображеніе, получающееся отъ наружной поверхности линзы, болѣе яркое, а другое, получающееся отъ приклеенной къ патрону поверхности, менѣе яркое и съ трудомъ замѣчаемое. Если линза правильно расположена на патронѣ, то приведя ее во вращеніе, замѣтимъ, что оба изображенія остаются неподвижными, въ противномъ же случаѣ они непрерывно перемѣщаются, и тогда линзу надо перемѣщать до тѣхъ поръ, пока упомянутыя изображенія не будутъ оставаться неподвижными во время вращения линзы. Когда мнѣ приходилось центрировать маленькую линзу этимъ способомъ, я одною ручкою *a* (фиг. 185) слегка придавливалъ вра-

щающуюся линзу къ неостывшему еще патрону, а другую *b* осторожно придвигать на мгновение до перваго прикословенія съ линзою поближе къ краю ея, причемъ болѣе отодвинутая отъ центра вращенія часть ея раньше всего ударялась о конецъ спички *b* и отъ этого толчка линза нѣсколько смѣщалась по направленію къ оси вращенія,



фиг. 185.

принимая болѣе правильное расположеніе на патронѣ, пока наконецъ не располагалась совсѣмъ правильно, что провѣрялось тѣмъ, что оба изображенія казались неподвижными при вращеніи линзы. Спички надо придвигать только до прикословенія и затѣмъ онѣ должны остаться на мѣстѣ, опираясь о стержень, вкатыый въ патронъ или о подручникъ. Всякое нечаянное толканіе спичкою портитъ дѣло. Этотъ способъ утомителенъ

и я во всякомъ случаѣ предпочитаю способъ описанный въ началѣ этого параграфа, т. е. способъ при помощи чувствительнаго ломаннаго рычага — тѣмъ болѣе, что передвиженіе длиннаго плеча его намъ сразу даетъ возможность сообразить, куда надо передвинуть линзу и кромѣ того, если этотъ приборъ аккуратно устроенъ, то при помощи его можно центрировать не только большія линзы, но и *очень малыя*.

Есть особые сложные патроны, къ которымъ прикрѣпляется линза во время центрированія и которые замѣняютъ цилиндрическіе патроны, упомянутые раньше (фиг. 181). На такомъ сложномъ патронѣ линза перемѣщается не непосредственно рукою, а при помощи винтовъ. Но можно обойтись и безъ этихъ патроновъ.

Замѣтимъ, что если линза такъ ошлифована, что ея края представляютъ линію сѣченія обѣихъ сферическихъ поверхностей, ограничивающихъ линзу, то понятно центрировать такой линзы не нужно, потому что, какъ извѣстно изъ геометріи, двѣ сферическія поверхности пересекаются по окружности, которой центръ находится на линіи центровъ, т. е. на линіи, соединяющей центры сферическихъ поверхностей, а по отношенію къ линзѣ эта линія и есть оптическая ось ея.

Въ заключеніе скажемъ, что центрированіе весьма важная часть работы въ приготовленіи оптическихъ инструментовъ. Если бы даже линза была во всѣхъ остальныхъ отношеніяхъ вполне хорошею, но не была бы центрированной, то она совсѣмъ теряла бы свою цѣну при изготовленіи серьезнаго оптического инструмента.

§ 103. Приготовленіе крокуса для полированія линзъ. Крокусъ — это красная окись желѣза (нѣмец. *Rothes Eisenoxid*, франц. *Oxide de fer rouge*, латинск. *Ferrum oxydatum rubrum*). Крокусъ есть въ продажѣ, но его можно приготовить и самому. Опшнхъ тотъ

способъ, по которому я готовилъ крокусъ. Желѣзные и стальные стружки, которыя образуются во время обработки на токарномъ станкѣ желѣзныхъ и стальныхъ предметовъ, бросаются въ глиняный сосудъ и туда же льется некрѣпкая сѣрная кислота примѣрно до половины сосуда. Наступаетъ шипѣніе и выдѣленіе неприятныхъ газовъ; поэтому сосудъ слѣдуетъ помѣстить на открытомъ воздухѣ или въ крайнемъ случаѣ вставить въ печку, если только въ ней не топится и есть хорошая тяга. Къ сосуду не слѣдуетъ подносить пламени, такъ какъ при дѣйствіи кислоты на желѣзо выдѣляется водородъ, который, смѣшиваясь съ воздухомъ образуетъ гремучій газъ, а послѣдній при зажиганіи производитъ взрывъ. По истеченіи нѣкотораго времени шипѣніе и выдѣленіе газа изъ сосуда совсѣмъ прекращаются и тогда оставшаяся въ сосудѣ жидкость сливается въ особый сосудъ, а на стружки опять наливается слабая сѣрная кислота и т. д. Когда наберется достаточно много жидкости, сливаемой съ опилокъ каждый разъ по прекращеніи выдѣленія газа, тогда эта жидкость процеживается и выливается въ широкій не металлическій сосудъ. Сосудъ прикрывается бумагою для предохраненія отъ пыли и такъ оставляется на нѣкоторое время. По истеченіи нѣсколькихъ дней на днѣ широкаго сосуда образуются зеленоватые кристаллы желѣзнаго купороса. Образование кристалловъ можно ускорить. Для этой цѣли надо слитую съ опилокъ жидкость нѣкоторое время кипятить въ широкомъ открытомъ сосудѣ, чтобы выпарить часть воды. Можно даже выпарить воду до такой степени, что въ остаткѣ получится желѣзный купоросъ въ видѣ густой массы, которая при полномъ высыханіи твердѣетъ и съ трудомъ отдѣляется отъ стѣнокъ сосуда. Полученный желѣзный купоросъ высушивается, заворачивается въ бумагу такъ, чтобы въ него не попадала пыль, и кладется въ теплое мѣсто, гдѣ онъ по истеченіи нѣкотораго времени превращается въ желтоватый порошокъ. Чтобы ускорить дѣло, можно помѣстить желѣзный купоросъ въ духовую печку, насыпавъ его въ какойнибудь сосудъ и прикрывъ бумагою. Наконецъ можно нагревать желѣзный купоросъ на скелородѣ, пока онъ не превратится въ желтый порошокъ. Образовавшийся желтый порошокъ перетирается, просѣивается и высыпается въ графитовый или гессенскій тигель. Тигель прикрывается крышкою и вставляется въ печь, въ раскаленные угли. Съ боковъ и сверху тигель тоже долженъ быть обложенъ раскаленными углями. Накалываніе должно быть ярко-красное но не бѣлое; кромѣ того надо заботиться, чтобы накалываніе тигля со всѣхъ сторонъ было равномерное. Примѣрно черезъ полчаса, когда тигель будетъ доведенъ до ярко-краснаго казенія и приметъ такой же яркій видъ, какъ и раскаленные угли, онъ вынимается особыми щипцами и содеражащійся

въ немъ порошокъ высынается въ ступку, перетирается и перемѣшивается. Затѣмъ берется темного этого порошку, сыплется на бумагу, увлажняется водою и размазывается по бумагѣ. Если при этомъ порошокъ обнаружитъ желтовато-кпрпичный цвѣтъ, то онъ (порошокъ) еще не готовъ и слѣдуетъ его накалывать дальше, пока при описанной пробѣ онъ не покажется *розоватымъ*. Тогда остается перетереть его и отмучивать съ водою. Если бы накалываніе доводилось добра, то порошокъ легко могъ бы сдѣлаться сѣрымъ. Тогда онъ очень твердый и даже въ тиглѣ образуетъ твердую массу, трудно разбиваемую. Важно, чтобы порошокъ равномерно накалывался и повсемѣстно припаялъ по возможности одинъ и тотъ же — однородный цвѣтъ. Поэтому, вынувъ тигель для испытанія, достаточно ли уже накалываніе, раньше, чѣмъ вставить тигель въ печь для дальнѣшаго накалыванія, надо всякій разъ хорошенько перетереть и перемѣшать порошокъ. Удобнѣе раздувать угли мѣхами, а не тягою, такъ какъ послѣдняя можетъ довести нагрѣваніе до бѣлаго каленія, а мы можемъ этого и незамѣтить при закрытыхъ дверцахъ печки. Приготовленіе вполне хорошаго крокуса не легкое дѣло и требуетъ не только терпѣнія, но и большой осмотрительности.

§ 104. **Приготовленіе полировальнаго слоя.** Нужно замѣтить, что при шлифованіи частицы шлифующаго матеріала (наждакъ) катаются между шлифующею и шлифуемою поверхностями и своими острыми краями дѣлають углубленія въ этихъ поверхностяхъ. При полированіи же частицы полирующаго матеріала (крокусъ) не должны кататься, а должны оставаться на мѣстѣ. Поэтому для полированія сферическую поверхность соответствующей шлифовальной формы необходимо покрыть такимъ слоемъ, на поверхности котораго частицы крокуса могли бы застрянуть и оставаться неподвижными. Для приготовленія такого *полировальнаго* слоя можетъ служить сукно, шелкъ, бумага и т. п. Желая, напр. приготовить полировальный слой изъ сукна, надо вырѣзать изъ тонкаго сукна кружокъ надлежащей величины и приклеить къ шлифовальной формѣ, радіусъ кривизны которой долженъ быть такой же, какой имѣетъ та сферическая поверхность стекла, которую мы намѣрены полировать. Суконный кружокъ можетъ быть прикрѣпленъ къ формѣ, напр. сплавомъ воска и канифоли, взятыхъ приблизительно въ равныхъ вѣсовыхъ частяхъ. Нагрѣвъ форму, заворачиваютъ въ чистую полотняную тряпку кусокъ упомянутаго сплава и водятъ по поверхности нагрѣтой формы. Сплавъ плавится, процеживается черезъ полотно и покрываетъ *обильно* поверхность формы. Затѣмъ, на подготовленную такимъ образомъ поверхность кладутъ суконный кружокъ, сворачиваютъ чистую полотняную тряпку въ шарикъ и имъ прижимають сукно къ формѣ, заботясь,

чтобы оно повсемѣстно хорошо пристало къ формѣ, а когда форма настолько остынетъ, что сдѣлается только теплою, сукно сильно прижимаютъ холодною обратною формою, предварительно подышавъ на нее, и такъ оставляютъ, до полного остыванія, послѣ чего обратную форму снимаютъ.

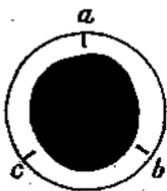
Кружокъ изъ шелка или бумаги прикрѣпляется лакомъ или венеціанскимъ терпентинномъ. Важно, чтобы приклеиваемый слой представлялъ къ поверхности формы правильно, безъ всякихъ складокъ, морщицъ и узловъ. Узлы можно устранить ножикомъ. Бумага приклеивается въ видѣ секторовъ.

Если готовится полировальный слой изъ указанныхъ матеріаловъ (сукно, шелкъ, бумага), то надо взять себѣ за правило: не брать для слоя куски со стараго платья, такъ какъ въ немъ всегда содержится много пыли, которая положительно вредитъ полированію.

Но ни одинъ изъ упомянутыхъ полировальныхъ слоевъ не можетъ сравниться съ полировальнымъ слоемъ изъ смолы (варъ). Для приготовленія полировальнаго слоя изъ смолы ее обыкновенно сплавляютъ съ одинаковымъ вѣсовымъ количествомъ канифоли. Я всегда готовилъ сплавъ слѣдующимъ образомъ. Смолу и канифоль, взятыя приблизительно въ равныхъ вѣсовыхъ частяхъ, расплавлялись вполнѣ и въ образовавшуюся такимъ образомъ жидкость вливался по каплямъ скипидаръ въ весьма ограниченномъ количествѣ, причемъ жидкость сильно перемѣшивалась. Затѣмъ, часть этой жидкости бралась на стеклянную палочку, вполнѣ охлаждалась и испытывалась сильнымъ нажатіемъ ногтя. Если ноготь при сильномъ давленіи не оставлялъ углубленія, то еще прибавлялось нѣсколько капель скипидара, жидкость перемѣшивалась и опять производилось испытаніе ногтемъ. Если ноготь при сильномъ давленіи оставлялъ незначительное углубленіе, то сплавъ считался готовымъ. Скипидаръ надо приливать съ большою осмотрительностью, такъ какъ избытокъ его дѣлаетъ сплавъ мягкимъ и непригоднымъ для полированія. Приготовленная такимъ образомъ масса въ горячемъ (вполнѣ жидкомъ) состояніи вливалась въ чистую полотняную тряпку, концы тряпки быстро скручивались и все содержимое въ ней обхватывалось особыми деревянными клещами, напоминающими по виду клещи для раздавливанія орѣховъ; тогда масса процеживалась въ подставленную широкую кастрюлю. Процеживаніе надо производить быстро, чтобы жидкость не застыла.

Чтобы изъ означенной массы приготовить полировальный слой, надо расплавить ее и налить на середину поверхности нагрѣтой горизонтально стоящей формы такъ, чтобы образовался слой толщиной примѣрно въ 3 мм.— 4 мм., недоходящій до краевъ формы. Затѣмъ пока слой еще не остылъ, надо положить на него обратную *холод-*

ную форму (предварительно подымавъ на нее) и придавить ее такъ, чтобы слой разошелся по-возможности до краевъ формы. Сдѣлавъ это, надо все такъ оставить до полного остыванія. Когда все остынетъ, наложенная форма отдѣляется прочь при помощи ножика, который вставляется острымъ ребромъ между обѣ формы и поворачивается подобно тому, какъ поворачивается ключъ при отпираниіи замка. Такимъ образомъ остающаяся на первой формѣ масса получаетъ правильную сферическую поверхность и представляетъ собою наилучшій полировальный слой. На поверхности этого слоя дѣлается рядъ параллельныхъ каналовъ по одному направленію и другой рядъ по направленію, менѣе-болѣе перпендикулярному къ первому. Такъ что сферическая поверхность полировального слоя раздѣляется на квадраты. Каналы эти нужны главнымъ образомъ для сохраненія избытка воды и крокуса во время полированія. Понятно, что поверхность накладываемой на слой формы должна быть вполнѣ чистою и имѣть такую же кривизну, какую имѣетъ та поверхность стекла, которую мы намѣрены поллировать. Наложенную на слой обратную форму не слѣдуетъ держать очень долго, такъ какъ смола (въ особенности въ теплѣ и подѣ давленіемъ) способна прильнуть къ предмету, къ которому прикасается долго. Поэтому упомянутое охлажденіе надо какъ нибудь ускорить, напр. при помощи струи холодной воды. Когда мнѣ приходилось готовить полировальный слой изъ смолы,



фиг. 186.

я клалъ на поверхности нагрѣтой горизонтально стоящей формы три кусочка слички *a*, *b* и *c* (фиг. 186), располагая ихъ симметрично на краяхъ формы. Затѣмъ, наливалась расплавленная масса (смола или сплавъ ей), а на налитую массу опускалась обратная холодная форма до прикосновенія съ положенными кусочками *a*, *b* и *c*. Благодаря такому приему, полировальный слой вездѣ имѣлъ приблизительно одина-

ковую толщину, а это далеко не безразлично при полированіи (въ особенности при полированіи на станкѣ, когда вращается форма съ полировальнымъ слоемъ).

§ 105. Полированіе линзъ. Когда полировальный слой уже готовъ, насыпаютъ на зеркальное стекло немного крокуса, увлажняютъ его нѣсколькими каплями воды и растираютъ кусочкомъ зеркальнаго же стекла или плоскимъ доннышкомъ небольшого стакана. Воду наилучше пускать при помощи пипетки, которую можно приобрести въ аптекѣ. Густота растертой смѣси должна напоминать густоту сливокъ. Увлажненный и растертый крокусъ наносится на поверхность полировального слоя при помощи промытой чистой кисточки и размазывается на немъ равномерно и тонко. На подготовленномъ

такимъ образомъ слоѣ и производится полировка линзъ. Приемы при полированіи въ общемъ тѣ же, что и при шлифованіи. По большей части полируютъ вручную, а то и на станкѣ. Если линза полируется на станкѣ, то обыкновенно вращается форма съ полировальнымъ слоємъ, а линза водится по поверхности слоя, смазаннаго увлажненнымъ крокусомъ, но примѣняется и обратный приемъ. Давленіе допускается сильное, лишь бы только материалы, употребляемые при полированіи (вещество полировальнаго слоя, крокусъ и т. д.) были чистые, безъ пыли. Сила давленія замѣтно влияетъ на быстроту полированія. Весьма важно, чтобы полирующая поверхность (поверхность полировальнаго слоя) была правильная и хорошо представляла къ полируемой поверхности линзы. Если полирующая поверхность притаиваетъ къ полируемой только въ нѣсколькихъ точкахъ, то полировка совѣтъ не удастся. Поэтому выгодно дѣлать полирующую поверхность нѣсколько меньше полируемой поверхности линзы, особенно если послѣдняя очень большая. Если полированіе идетъ правильно, то полировальный слой, будучи достаточно влажнымъ, оставляетъ на поверхности стекла (линзы) равномерный окрашенный слѣдъ крокуса. Если влага на полировальномъ слоѣ иссыхаетъ, то его увлажняютъ кисточкою, погруживъ ее предварительно въ чистую воду, которая должна находиться тутъ же подъ рукою въ особомъ стаканѣ. Собственно самая сильная полировка идетъ, когда слой становится уже мало влажнымъ. Но на сухомъ слоѣ полировать не слѣдуетъ. Чтобы узнать, насколько подвинулась полировка, обтираютъ стекло чистою льняною стиральною тряпкою и разсматриваютъ полируемую поверхность его при помощи сильной луы. Если на полируемой поверхности окажутся ячейки, то слѣдуетъ полировать дальше, пока упомянутыя ячейки не исчезнутъ по всей поверхности стекла. Ячейки лучше наблюдать при яркой лампѣ, чѣмъ днемъ.

Самая совершенная полировка достигается на полировальномъ слоѣ изъ смолы (или сплава ея съ канифолью и съ незначит. количествомъ скипидара). Превосходство полировки на смолѣ можно замѣтить не при помощи луы (микроскопа), а наблюденіемъ ньютонovýchъ колець, которыя являются, если сложить два стекла такъ, чтобы полировальная выпуклая поверхность одного прикасалась къ полированной вогнутой поверхности другого. Разсматривая сложенные такимъ образомъ стекла въ отраженномъ свѣтѣ, можно замѣтить, насколько рѣзки края этихъ колець. Чѣмъ совершеннѣе полировка, тѣмъ рѣзче эти края. Ньютоновыя кольца легче наблюдать не при дневномъ свѣтѣ, а при зажженной въ темной комнатѣ спиртовой лампочкѣ, на фитилѣ которой долженъ находиться кусочекъ натрія или мыла. Чтобы удобнѣе видѣть края колець, можно пользоваться (слабою) лукою.

Полировальный слой из смолы драгоцѣнъ тѣмъ, что частицы крокуса хорошо пристають къ поверхности его и, оставаясь на ней неподвижными, образуютъ такъ называемую, *полирующую пленку*, причемъ во время работы поверхность слоя вслѣдствіе нѣкоторой вязкости смолы принимаетъ правильный видъ и хорошо пристаєтъ къ полируемой поверхности. Вотъ именно, чтобы придать смолѣ нѣкоторую вязкость, я прибавляю къ смолу и капшфолн ничтожное количество скипидара. Много его нельзя прибавлять, потому что смолу съдѣлался бы чрезчуръ вязкимъ, а отъ этого поверхность полирующаго слоя могла бы легко мѣнять свою форму во время полированія. Можетъ произойти случай, когда отъ частаго прибавленія слишкомъ большихъ порціи крокуса поверхность полировальнаго слоя будетъ содержать его больше, чѣмъ сколько нужно для образованія полирующей пленки и тогда лишній крокусъ обращается въ свободно катающіяся частицы, которыя не полируютъ, а шлифуютъ и портятъ уже достигнутую полировку. Въ такомъ случаѣ надо начать полировку сначала на новомъ полировальномъ слое.

Полированіе не всегда является легкимъ дѣломъ. Нейманъ въ своемъ сочиненіи (*Die Brillen...*) говоритъ, что полированіе (равно какъ и тонкое шлифованіе) иногда приводитъ работника въ полное отчаяніе. Дѣло въ томъ, что иногда случается, что, когда полировка близится уже къ концу, неожиданно на полируемой поверхности являются безпощадныя царапины, сопровождаемыя обыкновенно характернымъ визгомъ и работникъ иногда не знаетъ, гдѣ причина этого явленія. Такая непріятная неожиданность часто повторяется подрядъ много разъ. Поэтому во время полированія аккуратность и чистота на первомъ планѣ. Какъ бы ни казался крокусъ хорошимъ, его передъ употребленіемъ всякій разъ надо растереть, какъ это уже было сказано выше. Остающійся на зеркальномъ стеклѣ крокусъ надо тщательно прикрывать, чтобы въ него не попала пыль. Не полировать въ комнатѣ, въ которой только что подмели. Не полировать при открытыхъ окнахъ, когда на дворѣ сильный вѣтеръ, поднимающій столбы пыли. Проверить, не сыпется ли съ потолка. Въ нѣкоторыхъ мастерскихъ потолки обиваютъ жестью. Тряпки для обтиранія стеколъ должны быть хранимы въ хорошо закрытыхъ ящикахъ. Подъ рукою должно быть ведро съ обильнымъ количествомъ воды, чтобы всякій разъ въ случаѣ надобности можно было обмыть тотъ или другой предметъ, употребляемый при полированіи. Не бѣда, если въ воду попадутъ песчинки, ибо онѣ по истеченіи нѣкотораго времени послѣ взбалтыванія осѣдаютъ на дно ведра. Конечно, тѣмъ труднѣе полировка, чѣмъ больше дива. Полированіе малыхъ дивъ сравни-

тельно еще нетрудное дѣло и при правильномъ ходѣ работы оно совершается довольно быстро.

§ 106. **Испытаніе линзъ.** Если линза готовится для серьезнаго оптическаго инструмента, то послѣ полировки она подвергается испытанію. Цѣль испытанія линзы состоитъ въ томъ, чтобы узнать, правильны ли тѣ сферическія поверхности, которыми она ограничена и имѣютъ ли эти поверхности надлежащій радіусъ, какой долженъ быть по предварительнымъ вычисленіямъ. При массовомъ изготовленіи линзъ для испытанія ихъ заготавливаютъ такъ называемыя *пробныя стекла*: съ вогнутыми полированными поверхностями для испытанія выпуклыхъ поверхностей линзъ, и съ выпуклыми полированными поверхностями для испытанія вогнутыхъ поверхностей линзъ. Сферическая поверхность каждаго пробнаго стекла должна быть вполне правильно и имѣть опредѣленный радіусъ; поэтому пробныя стекла готовятся очень осмотрительно. Если желаютъ испытать, положимъ, выпуклую поверхность линзы, то кладутъ линзу на соответствующее пробное стекло съ вогнутою поверхностью такъ, чтобы испытываемая выпуклая поверхность линзы легла на вогнутую поверхность пробнаго стекла и затѣмъ въ отраженномъ свѣтѣ наблюдаютъ тотъ тонкій слой воздуха, который является между двумя сложенными поверхностями. Если при этомъ являются ньютонovyя кольца у краевъ линзы, то это показываетъ, что радіусъ испытываемой поверхности больше надлежащаго. Если ньютонovyя кольца являются по серединѣ линзы, то это показываетъ, что радіусъ испытываемой поверхности меньше надлежащаго. Если вмѣсто колець являются неправильныя фигуры, то это показываетъ, что испытываемая поверхность имѣетъ неправильную форму. Руководствуясь этими наблюденіями, исправляютъ линзу мѣстной полировкой до тѣхъ поръ, пока при наложеніи на пробное стекло пространство между сложенными стеклами не покажется менѣе-болѣе однороднымъ. Мѣстную полировку можно производить такъ, что въ то время, какъ линза вращается на станкѣ, ее полируютъ главнымъ образомъ по краямъ, если хотятъ увеличить кривизну (уменьшить радіусъ) исправляемой выпуклой поверхности, и обратно: полировку производятъ главнымъ образомъ по серединѣ, если хотятъ уменьшить кривизну. Если исправляется вогнутая поверхность, то надо поступать обратно.

Испытаніе большихъ линзъ, предназначаемыхъ для телескопа, производится посредствомъ наблюденія неподвижной (или искусственной) звѣзды, о чемъ говорилось въ § 90. Неправильности чаще всего располагаются на поверхности линзы по зонамъ и состоятъ въ томъ, что нѣкоторыя зоны выше или ниже остальной поверхности линзы. Чтобы найти, у какой зоны и какой недостатокъ, поступаютъ

слѣдующимъ образомъ. Предполагая неправильность въ нѣкоторой зонѣ, начинаютъ ее нагрѣвать (или охлаждать), вода по ней теплою рукою (или ватой, пропитанною сѣрпымъ эфиромъ) и въ то же время не перестаютъ наблюдать изображение звѣзды, получаемое посредствомъ испытываемой линзы. Если, напр. при охлажденіи извѣстной зоны наступаетъ улучшеніе въ изображеніи, то это признакъ, что зона слишкомъ выпукла; тогда устраниютъ недостатокъ умѣлымъ полированіемъ этой зоны. Если же наступаетъ улучшеніе при нагрѣваніи зоны, то это значитъ, что зона нѣсколько вогнута сравнительно съ остальною поверхностью линзы, и тогда надо произвести мѣстное полированіе на остальной части поверхности, исключая эту зону.

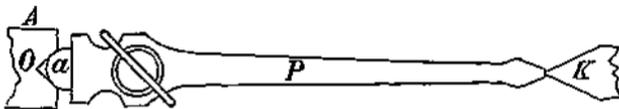
Мѣстная полировка — весьма отвѣтственная работа и требуетъ большой сообразительности и опытности.

§ 107. Приготовление очень малыхъ линзъ для микроскопа. При изготовленіи очень малыхъ линзъ надо имѣть возможность отрѣзать отъ стеклянной плиточки тонкую пластинку въ 1 или 2 мм. толщиной. Стекло рѣжется на пластинки при помощи быстро вращающагося цинковаго круга, края котораго набиты алмазнымъ порошкомъ; при этомъ цинковый кругъ во время вращенія долженъ постоянно смачиваться керосиномъ. Такой кругъ можно приготовить и самому слѣдующимъ образомъ. На токарномъ станкѣ готовится кружокъ изъ тонкаго цинковаго листа (толщина листа примѣрно 0,4 мм). Затѣмъ на гладкую чугунную плитку насыпается нѣсколько зеренъ алмазнаго порошку и по этимъ зернамъ катается упомянутый цинковый кружокъ, надавливаемый съ нѣкоторой силой на чугунную плитку и удерживаемый въ вертикальномъ положеніи. Зерна алмаза, попадая подъ края кружка, вонзаются въ цинкъ и такъ остаются въ немъ. Зерно иногда застриваетъ такъ удачно, что держится очень крѣпко. *) Кружокъ приспособляется такъ, чтобы его можно было посадить на ось и привести въ правильное вращеніе. Разрѣзываемое стекло должно быть прикрѣплено къ особенному держателю такимъ образомъ, чтобы оно могло вращаться около оси, параллельной оси вращенія цинковаго кружка. Никакихъ другихъ движеній или колебаній стекло не должно имѣть. Само рѣзаніе стекла производится такимъ образомъ, что подъ цинковый кружокъ подставляется сосудъ съ керосиномъ такъ, чтобы нижніе края кружка нѣсколько погружались въ керосинъ. Кружокъ приводится въ быстрое вращеніе и къ нему придвигается вручную стекло, вращающееся въ плоскости, перпендикулярной къ оси вращенія кружка. Какъ только цинковый кру-

Надо остерегаться, чтобы алмазный порошокъ не попалъ на шлифовальную чашку.

жокъ станетъ касаться стекла, онъ начнетъ его рѣзать, погружаясь все глубже и глубже въ него. Стекло не слѣдуетъ надавливать сильно на кружокъ. Если бы кружокъ искривился, то его необходимо выпрямить. Для этого приводятъ его въ быстрое движеніе на токарномъ станкѣ, обхватываютъ съ обѣихъ сторонъ двумя стальными стержнями, заокругленными на концахъ, и наклоняютъ стержни такъ, чтобы точки прикосновенія ихъ съ поверхностью кружка перемѣщались отъ середины къ краю кружка, въ плоскости, перпендикулярной къ оси вращенія кружка, причемъ стержни должны постоянно располагаться другъ противъ друга, сильно опираясь на подручникъ и сдвигая кругъ съ обѣихъ боковъ, а для устранения тренія стержни должны быть смазаны саломъ. Въ прежнія времена стекло рѣзали на пластинки при помощи мѣдныхъ тонкихъ и быстро вращающихся круговъ, которые во время вращенія постоянно смазывались смѣсью керосина съ мелкимъ наждакомъ. Смазываніе достигалось такимъ образомъ, что кругъ во время вращенія постоянно касался подвѣшенной надъ нимъ тряпки, обливаемой керосиномъ съ примѣсью мелкаго наждаку.

Шлифовальныя чашки (формы) для весьма малыхъ линзъ готовятся нѣсколько иначе, чѣмъ какъ описано раньше. Для приготовленія такой чашки надо прежде всего заготовить особый шаблонъ. Для этой цѣли на токарномъ станкѣ аккуратно вытачивается стальной кружокъ съ острыми краями. Діаметръ этого кружка долженъ быть строго опредѣленной величины и провѣряется калиброметромъ, о которомъ упоминалось въ § 77. Приготовивъ такой кружокъ, закалываютъ его и зажимаютъ въ особый пинцетъ, снабженный зажим-



фиг. 187.

нымъ винтомъ. Такой пинцетъ употребляется часовыхъ дѣлъ мастерами. Пинцетъ съ зажатымъ кружкомъ представляетъ собою родъ сверла, которымъ и высверливается на токарномъ станкѣ сферическое углубленіе весьма малаго радиуса. На черт. (фиг. 187) схематически представлено расположеніе пинцета P съ зажатымъ кружкомъ a во время сверленія. Латунный цилиндръ A предполагается зажатымъ въ патронъ. Въ основаніи этого цилиндра выточено небольшое углубленіе O, въ которое погружается кружокъ a въ то время, какъ правый конецъ пинцета упирается въ кернеръ (центр) K, засаженный въ выдвижной стержень подвижной бабки. Само сверленіе про-

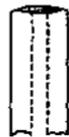
изводится по тѣмъ приѣмамъ, какими пользуются вообще при сверленіи на токарномъ станкѣ; только работа производится весьма осмотрительно и безъ торопливости.

Когда шлифовальная чашка готова, отрѣзывается при помощи упомянутого выше цинкового круга стеклянная пластинка, которой толщина должна быть такая же, какъ у изготовляемой линзы, или чуть-чуть больше. Изъ этой пластинки заготавливается кружокъ. Кружокъ приклеивается шеллакомъ къ стержню, аккуратно обточенному. На чертежѣ (фиг. 188) изображенъ такой стержень *A* въ натуральную величину. Чтобы приклеить стекло, надо копецъ стержня *A* нагрѣть, покрыть расплавленнымъ шеллакомъ и прижать къ нему нагрѣтое стекло. Такъ какъ шеллакъ быстро остываетъ, то не всегда удается сразу прикрѣпить стекло правильно; поэтому полезно вторично нагрѣть стекло уже на стержнѣ и окончательно расположить его на стержнѣ, прижимая къ нему. Въ случаѣ надобности края приклееннаго стеклянного кружка ошлифовываются такъ, какъ при центрированіи линзъ



фиг. 188.

(§ 102), причемъ для приведенія стержня *A* съ приклееннымъ стекляннымъ кружкомъ въ быстрое вращеніе, его (стержень *A*) надо правильно закрѣпить въ патронѣ. Потомъ ручка *A* со стекломъ вынимается изъ патрона и дальше стекло, удерживаемое на стержнѣ (ручкѣ) *A*, подвергается шлифованію и полированію менѣе-болѣе по тѣмъ же правиламъ, какія изложены для большихъ линзъ. Но конечно шлифованіе производится сразу мелкимъ наждакомъ въ шлифовальныхъ чашкахъ, изготовляемыхъ описаннымъ въ этомъ параграфѣ путемъ.



фиг. 189.

Чтобы края двояковыпуклой линзы при обработкѣ ея не открывались, я бралъ коротенькую стеклянную трубку съ толстыми стѣнками, на одномъ концѣ ея вышлифовывалъ сферическое углубленіе и вклеивалъ въ него ливзу тою стороною, которая была уже вполнѣ ошлифована; другая же сторона линзы обрабатывалась на стеклянной трубчкѣ (фиг. 189).

Опишу способъ, по которому я готовилъ малыя плосковыгнутыя стекла для объектива микроскопа. Одна сторона стеклянной плитки шлифовалась и полировалась на плоскость.

Надо замѣтить, что если желаютъ полировать плоскую поверхность на смоляномъ слѣѣ, то надо позаботиться, чтобы послѣдній былъ достаточно твердымъ, дабы обезпечивалось постоянство поверхности его. Относительныя количества смолы и кауифоли, входящія въ составъ полировальнаго слоя, трудно указать, потому что эти количества зависятъ отъ температуры, при которой приходится работать.

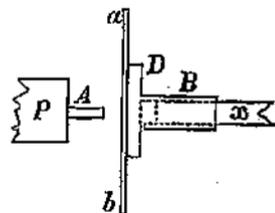
Когда одна сторона стеклянной плитки была обработана на плоскость, отъ нея (плиты) отрѣзывалась при помощи цинковаго кружка (§ 107) тонкая пластинка, напр. въ 1 мм. толщиною. Изъ полученной пластинки вырѣзывался кружокъ надлежащаго діаметра. Схематическій чертежъ (фиг. 190) поясняетъ, какъ это было сдѣлано. Цинковая трубка *A*, зажатая въ патронъ токарнаго станка, была обточена такъ, что внутренній ея діаметръ былъ чуть-чуть больше діаметра приготавлиаемаго стекляннаго кружка. Толщина стѣнокъ трубки составляла около 0,5 мм. На выдвигной стержень *x* правой бабки (§ 97) надѣвался латунный цилиндръ *B* (фиг. 190).

Цилиндръ *B* былъ выточенъ такимъ образомъ, что онъ способенъ былъ двигаться лишь вдоль стержня *x*, по никакихъ боковыхъ колебаній не имѣлъ. Онъ былъ снабженъ кружкомъ *D*. Къ этому кружку приклеивалась упомянутая стеклянная пластинка. Она приклеивалась къ кружку *D* неотполированной стороною, такъ что полированная сторона ея была обращена къ трубкѣ *A*.

Подвижная (правая) бабка придвигалась влѣво на столько, что стеклянная пластинка *ab*, приклеенная къ кружку *D*, отстояла примѣрно на 5 мм. отъ трубки *A*. Трубка *A* смазывалась увлажненнымъ мелкимъ наждакомъ и приводилась въ быстрое вращеніе. Въ это время трубка *B* придвигалась рукою влѣво на столько, чтобы стеклянная пластинка *ab* прикасалась къ краямъ трубки *A*, которые благодаря присутствію наждаку, мало-помалу производили на поверхности пластинки *ab* кольцообразное углубленіе. Оно становилось все глубже и глубже и наконецъ отъ пластинки *ab* отдѣлялся кружокъ.

При этой работѣ стеклянную пластинку *ab* не слѣдуетъ долго держать въ соприкосновеніи съ краями трубки *A*. Выгодно стеклянную пластинку *ab* то придвигать къ трубкѣ *A* до прикосновенія на нѣсколько секундъ — то отодвигать, причемъ надо почаще наносить на края трубки *A* свѣжія порціи мелкаго наждаку, а старый устранять. Надо избѣгать *вращательнаго* движенія трубки *B*.

Вырѣзанный кружокъ приклеивался къ особой трубкѣ (фиг. 181) концентрично и тою стороною, которая была полирована. Необработанная же сторона кружка была обращена наружу. На этой сторонѣ я вытачивалъ по шаблону сферическое углубленіе при помощи маленькихъ трехгранныхъ напильниковъ, концы которыхъ были хорошо ошлифованы въ видѣ трехгран. угла съ ребрами нѣсколько заостренными. Эта работа требуетъ большаго вниманія. Напильникъ опирается на подручникъ, причемъ конецъ напильника надо почаще



фиг. 190.

обмакивать въ скипидаръ или керосинъ. Однимъ напильникомъ можно работать не больше двухъ-трехъ минутъ, потому что ребра быстро притупляются. Поэтому заготавливается сразу нѣсколько (штукъ 5) напильниковъ. Когда концы всѣхъ напильниковъ притупятся, ихъ нужно вторично ошлифовать на точилѣ или наждачномъ сухомъ кругѣ. Напильники можно замѣнить маленькими рѣзцами, которые можно приготовить изъ тонкихъ стальныхъ прутковъ. Нужно только, чтобы сталь была хорошая. Концы такихъ рѣзцовъ закалываются такимъ образомъ, что сначала они (концы) нагрѣваются до ярко-краснаго каленія и затѣмъ быстро погружаются въ холодную воду. Отпускать не слѣдуетъ.

Дальнѣйшая шлифовка вогнутой поверхности стеклянаго кружка производится, конечно, при помощи наждаку на шлифовальныхъ формахъ, какъ это уже было указано раньше.

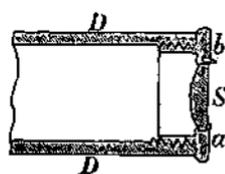
§ 108. **Склеиваніе линзъ.** На металлической треножницѣ (фиг. 176) кладется металлическая пластинка или сѣтка, а на нее плотный картонъ. На картонъ же кладутся чистыя стекла, которыя предполагается склеить. Затѣмъ, металлическая пластинка или сѣтка равномерно подогревается снизу, благодаря чему нагрѣвается картонъ и стекла. Когда стекла достаточно нагрѣются, берется барсучья кисточка и ею тщательно устраняется всякая пыль съ тѣхъ поверхностей, которыми стекла должны быть склеены. Затѣмъ на вогнутую поверхность одного изъ стеколъ пускается капля расплавленнаго канадскаго бальзама, на нее кладется другое стекло надлежащею стороною. Наложивъ другое стекло, надо двигать его по поверхности перваго, какъ бы желая растереть бальзамъ. Это дѣлается затѣмъ, чтобы бальзамъ разошелся по всей поверхности склейки и чтобы удалились пузырьки воздуха. Лишній бальзамъ устраняется прижиманіемъ одного стекла къ другому. Если склеиваемыя линзы хорошо центрированы и діаметры ихъ одинаковы, то правильное (концентрическое) склеиваніе легко достигается; нужно только наблюдать, чтобы при склеиваніи края одной линзы нигдѣ не выдавались болѣе краевъ другой. Лишній бальзамъ, выкатый наружу, смывается спиртомъ послѣ застыванія его (бальзама). Само собою разумѣется, что тѣ поверхности, по которымъ склеиваются линзы, должны имѣть одинакую кривизну (одинаковаго радіуса). Если понадобится отдѣлить одну линзу отъ другой, то нужно вторично нагрѣть линзы и тогда легко стянуть одно стекло съ поверхности другого.

Кисточку, употребляемую для удаленія пыли, нужно промывать въ бензинѣ и хранить въ закупоренной банкѣ или ящикѣ.

Линзы большихъ телескопическихъ объективовъ не склеиваются, а перекладываются оловянными листочками, располагающимися сямъ

метрично въ трехъ мѣстахъ около краевъ стеколъ. Листочки приклеиваются къ одному изъ стеколъ камедью и должны быть одинаковой толщины.

§ 109. Закрѣпленіе небольшихъ линзъ въ оправу. Кольцеобразный латунный отливочъ правильно зажимается въ патронъ и обрабатывается сначала одна его сторона, причемъ на выдающемся концѣ его дѣлается наружная винтовая нарѣзка. Въ другомъ патронѣ правильно обтачивается зажатая трубка съ достаточно толстыми стѣнками, и на концѣ ея дѣлается внутренняя винтовая нарѣзка такъ, чтобы кольцо, зажатое въ первый патронъ, могло удобно завинчиваться въ эту трубку. Вынувъ кольцо изъ перваго патрона и навинтивъ его на конецъ упомянутой трубки (фиг. 191), обрабатываютъ другую его (кольца) сторону, причемъ вытачиваютъ углубленіе для линзы, оставляя по краямъ углубленія тонкую стѣнку въ видѣ кольцеобразнаго выступа. Диаметръ углубленія для стекла долженъ какъ-разъ равняться диаметру линзы и линза должна входить свободно въ углубленіе, но при этомъ въ самомъ углубленіи она не должна имѣть возможности пошатываться въ сторону въ плоскости, перпендикулярной къ оси вращения шпинделя. Линза должна углубляться въ сдѣланное для нея вмѣстилище на столько, чтобы надъ нею еще оставался упомянутый кольцеобразный выступъ съ тонкими стѣнками. Толщина этихъ стѣнокъ должна быть около 0,1 мм. Теперь, чтобы закрѣпить линзу, вставленную въ углубленіе, достаточно загнуть стѣнки выступа вовнутрь такъ, чтобы онѣ легли на саму линзу. Это дѣлается при помощи небольшого давилъника, который представляетъ собою стальной стержень съ ручкою. Конецъ этого стержня расплюсченъ, закаленъ, ошлифованъ, отлично отполированъ и не имѣетъ острыхъ краевъ. Во время закрѣпленія линзы она вращается вмѣстѣ съ оправою, а давилъникъ твердо опирается на подручникъ (или на стержень, закаленный въ супортъ) въ то время, какъ конецъ его, доведенный до прикосновенія съ краями кольцеобразнаго выступа, надавливаетъ на стѣнки его, загибая ихъ вовнутрь на линзу. Загибаніе должно начинаться съ верхушекъ выступа. При этой работѣ конецъ давилъника долженъ быть смазанъ жиромъ, который послѣ легко устраняется бензиномъ. На чертѣжѣ (фиг. 191) нижняя часть *a* выступа представлена уже загнутою, тогда какъ верхняя *b* представлена еще незагнутою. Иногда раньше закрѣпленія линзы чернятъ оправу. О черненіи говорилось въ § 95.



фиг. 191.

Для закрѣпленія въ оправу весьма малыхъ линзъ, какія употребляются для объектива микроскопа, я выработалъ себѣ такой способъ. Былъ приготовленъ стержень PQ (фиг. 192). Лѣвый конецъ его закапчивался цилиндркомъ a , котораго діаметръ какъ-разъ равнялся діаметру углубленія O для закрѣпляемой линзы. Кромѣ



фиг. 192.

того стержень PQ былъ снабженъ крючкообразнымъ рѣзцомъ z съ остриемъ, немного недоходящимъ до конца цилиндрика a . Въ щель, образовавшуюся между цилиндромъ a и рѣзцомъ z , вставлялась очень тонкая пластинка, которой толщина повѣрялась калиброметромъ § 77. Затѣмъ, винтъ P отвинчивался и рѣзецъ z придвигался къ цилиндру a на столько, на сколько позволяла вставленная пластинка. Послѣ этого винтъ P завинчивался, а вставленная пластинка устранялась. По устраненіи пластинки между цилиндромъ a и рѣзцомъ z образовалась весьма узкая едва замѣтная щель, ширина которой была опредѣленная и равнялась толщинѣ пластинки. Потомъ, лѣвый конецъ a стержня PQ осторожно вставлялся въ углубленіе O , тогда-какъ правый конецъ Q упирался въ кернеръ подвижной бабки. Оправа mn приводилась въ медленное движеніе (вращательное), лѣвою рукою придерживался стержень PQ , а правою сообщалось ему медленное *поступательное* движеніе влѣво вращеніемъ соответствующей ручки или колеса у подвижной бабки. При движеніи стержня PQ влѣво цилиндрикъ a углублялся въ отверстіе O все глубже и глубже, причемъ и конецъ рѣзца z доходилъ до поверхности оправы mn и производилъ на поверхности mn кольцеобразный каналъ, а между этимъ каналомъ и углубленіемъ O оставалась неснятая кольцеобразная весьма тонкая стѣнка, которой толщина почти равнялась ширинѣ щели между цилиндркомъ a и рѣзцомъ z . Эта кольцеобразная стѣнка происходила именно, благодаря присутствію означенной щели между цилиндркомъ a и рѣзцомъ z . Какъ только острие рѣзца z углубилось примѣрно на 0,5 mm., работа прекращалась и стержень PQ устранялся. Затѣмъ, часть плоской поверхности mn , расположенная внѣ упомянутаго кольцеобразнаго канала, нѣсколько стачивалась перпендикулярно къ оси вращенія, стекло вставлялось въ углубленіе O и закрѣплялось малымъ давилъникомъ. Давилъникъ опирался на стержень, зажатый въ супортъ, причемъ концу его сообщалось такое движеніе, что онъ (конецъ) скользилъ по наружной только-что обточенной поверхности, пока не попадалъ въ кольцеобразный каналъ. Тогда онъ останавливался и надлежащими наклоненіями самого стерж-

жи дави́льни́ка ко́льцеобразна́я стѣнка, чуть-чуть выдающаяся надъ стекломъ, загибалась на стекло во время вращенія оправы *m* вы́стъ со стекломъ.

Вся эта работа производится при помощи лупы. Лупу, въ надлежащей оправѣ, лучше всего прикрѣплять на головѣ передъ глазомъ посредствомъ резиновой ленты, чтобы лупа сама держалась, а руки были свободныя.

Углубленіе *O* въ оправѣ для малыхъ линзъ я вытачивалъ при помощи малаго рѣзца, натуральная величина котораго изображена на чертежѣ (фиг. 193). Этотъ рѣзецъ закрѣплялся въ супортъ такъ, что только незначительная часть его выдавалась наружу и имъ растачивалось высверленное въ оправѣ маленькое отверстие. Каждый разъ бралась ничтожная стружка и каждый разъ послѣ этого производилось испытаніе, не входитъ ли уже въ углубленіе особый цилиндрикъ, который предварительно былъ аккуратно изготовленъ и діаметръ его равнялся діаметру закрѣпляемой линзы. Саму линзу не слѣдуетъ вставлять въ углубленіе до тѣхъ поръ, пока оно не будетъ готово вполне, потому что линза можетъ застрять, не доходя вплотную до дна углубленія; когда же мы станемъ ее выталкивать, то края ея могутъ легко отколоться, въ слѣдствіе чего линза испортится и напрасно потеряется время. Даже въ готовое углубленіе линзу надо вставлять осторожно. Для этого полезно ее временно приклеить къ концу палочки, чтобы имѣть возможность помѣстить ее въ углубленіе правильно. Дѣло въ томъ, что малѣйшая щербина у крошечной линзы можетъ дѣлать послѣднюю непригодною. Между прочимъ замѣтимъ, что само стекло для крошечныхъ линзъ должно быть вполне чистое и свободно отъ пузырьковъ, что можно повѣрить лупою. Растачиваніе углубленія для крошечной линзы совершается тоже при помощи лупы.



фиг. 193.

§ 110. Чистка стеколь. Смочивъ водою чистую льняную стиральную тряпку, снимають ею пыль со стекла, а затѣмъ осторожно вытирають поверхность стекла сухою тряпкою. Тряпки надо хранить въ закупоренной банкѣ или ящикѣ. Вообще надо избѣгать частаго вытиранія стекла, такъ какъ всегда на поверхность стекла можетъ попасть пыль, способная при неосторожномъ вытираніи образовать царапины на стеклѣ, а при частомъ вытираніи эти царапины могутъ испортить полировку стекла. Жирныя пятна смываются бензиномъ или спиртомъ. Не надо забывать, что отъ спирта можетъ испортиться лакировка оправы. Кедровое масло съ микроскопическихъ объективовъ смывается бензиномъ при помощи кисточки и чистой тряпочки.

§ 111. Закрѣпленіе паутинныхъ нитей въ окулярѣ. Иногда въ плоскости, гдѣ обыкновенно помѣщается діафрагма поля зрѣнія,

надо закрѣпить паутинныя нити. Для этого готовится особое латунное кольцо. На одной сторонѣ этого кольца по направленію двухъ взаимно перпендикулярныхъ діаметровъ его проводятся рѣзцомъ двѣ чистыя черты. Затѣмъ, концами циркуля захватывается паутинная нить, располагается по одному изъ этихъ діаметровъ въ углубленіяхъ черты, натягивается и прикрѣпляется къ кольцу растворомъ шеллака въ спиртѣ. Подобнымъ образомъ прикрѣпляется и другая нить. Само кольцо съ паутинками прикрѣпляется къ трубкѣ окуляра при помощи четырехъ винтовъ, проходящихъ снаружки черезъ стѣнки ея. Надо наблюдать, чтобы на паутинныхъ нитяхъ не было пыли, что можно провѣрить, разсматривая паутинныя нити черезъ лупу, да и само прикрѣпленіе паутинныхъ нитей производится при помощи лупы.

§ 112. **Наводна зеркаль.** Готовятся четыре слѣдующихъ раствора:

1. 4 грамма ляписа на 100 граммовъ дистиллированной воды,
2. 5,8 грам. азотнокислаго аммоніа на 100 грам. дист. воды,
3. 9,5 грам. ѣдкаго кали на 100 грам. дист. воды,
4. Растворъ 9,6 грам. сахару и 1,1 грам. виннокислотной (винной) кислоты въ 100 грам. дистиллированной воды кипятятъ 10 минутъ и прибавляютъ 20 куб. сантиметровъ 90° спирта.

Смѣшиваютъ въ равныхъ объемахъ растворъ 1 и 2 (растворъ *A*), затѣмъ смѣшиваютъ въ равныхъ объемахъ растворъ 3 и 4 (растворъ *B*).

Желая посеребрить поверхность стекла, надо ее вытереть крѣпкою азотною кислотою, затѣмъ слабымъ растворомъ ѣдкаго кали и промыть въ дистиллированной водѣ. Затѣмъ, смѣшиваютъ растворъ *A* и *B* хорошо взбалтываютъ и немедленно погружаютъ въ образовавшуюся смѣсь стекло внизъ тою стороною, которую желаютъ посеребрить и покачиваютъ темнѣющую жидкость минутъ 10. Если серебреніе идетъ медленно, то берутъ растворъ 2 въ большемъ количествѣ.

Высеребренное зеркало слѣдуетъ прополоскать въ водѣ, а затѣмъ въ спиртѣ и высеребренную сторону покрыть прозрачнымъ лакомъ. Растворы *A* и *B* полезно готовить незадолго до употребленія

