

профилей реализуется наиболее устойчивый в некотором смысле, то можно построить теорию осредненного турбулентного течения в окрестности твердого тела без каких-либо эмпирических коэффициентов.

Таким образом, одним из фундаментальных направлений развития теории турбулентности, по-видимому, становится анализ гидродинамической устойчивости осредненного турбулентного течения в целом.

В заключение упомянем о совсем новой идее, связанной с проблемой общего описания турбулентности<sup>19</sup>. В указанной работе делается попытка перенести в теорию турбулентности свойства подобия термодинамических систем с сильно взаимодействующими флуктуациями. Новые методы анализа пристенной турбулентности привели к открытию ряда новых эффектов, имеющих чрезвычайно важное прикладное значение. Здесь мы ограничимся двумя примерами.

Экспериментально был подтвержден и изучен предсказанный теорией пограничного слоя с исчезающей вязкостью эффект оттеснения турбулентного пограничного слоя от проникаемой поверхности. Созданные методы расчета позволили охватить многочисленные течения со сложными граничными условиями, включая физико-химические превращения и проблему ламинаризации пограничного слоя.

Турбулизация плазменного шнура в электродуговых плазмогенераторах приводит к существенно новым конструктивным решениям соответствующих агрегатов для высокотемпературной химической технологии.

Взаимодействие турбулентных течений с электромагнитными полями и турбулентность в диспергированных средах являются в настоящее время предметом новых разделов физической гидромеханики.

---

<sup>19</sup> Кузьмин Г. А., Поташинский А. З. Гипотеза подобия и гидродинамическое описание турбулентности.— «Журнал экспериментальной и теоретической физики», 1972, т. 62, № 3, с. 1175—1184.

## ПЕРВЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОШИБКАХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. А. ГУРИКОВ

Первой погрешностью оптических систем, с которой столкнулись ученые, была сферическая абберация. Продольная сферическая абберация для случая вогнутого сферического зеркала была известна еще Ибн ал Хайсаму (Альхазену) в X в. н. э.<sup>1</sup> Кроме того, уже в античности было известно, что только в параболическом зеркале падающий параллельный пучок лучей собирается в одной точке и именно зеркало такой формы обладает наибольшей зажигательной силой. Это означает, что параболическое зеркало не имеет сферической абберации. Строгое математическое доказательство наличия продольной сферической абберации было дано в XIII в. Роджером Бэконом<sup>2</sup>.

Вопросы аббераций оптических систем встречаются в XV в., у Леонардо да Винчи. В его манускриптах немало рисунков, на которых изображены каустические кривые. Им же дается экспериментальный метод определения аббераций, напоминающий некоторые формы современных абберометров<sup>3</sup>. Математическое определение продольной сферической абберации вогнутого сферического зеркала можно найти и в сочинении Франческо Мавролико «*Photismi de lumine et umbra*»<sup>4</sup>.

После создания в конце XVI — начале XVII в. телескопа вопрос об абберациях оптических систем встает с особенной остротой. Кроме того, широкое распространение телескопов и использование их в качестве научного инструмента в астрономии предъявляет новые требования к качеству изображения. Это приводит к необходимости изыскания методов исправления аббераций оптических систем.

Сферическую абберацию в XVII в. пытались исправить в основном двумя способами: использованием асферических поверхностей (Рене Декарт, Христиан Гюйгенс) и увеличением длины трубы (фокусного расстояния) телескопа.

Первый способ не нашел в XVII в. практического применения, так как даже в наши дни изготовление линз с асферическими поверхностями встречает большие трудности. Вместе с тем именно в XVII в. были разработаны интересные методы расчета асферических поверхностей линз. Так, например, VIII глава «*Диоптрики*» Р. Декарта посвящена вопросу расчета геометрических поверхностей оптических линз, свободных от сферических аббераций. Комбинируя гиперболические и эллиптические поверхности со сферическими, Декарт с помощью двух линз полностью исправляет сферическую абберацию для произвольного положения предмета.

Несколько позже Декарт нашел более общее решение вопроса исправления сферических аббераций, заменив две линзы одной с преломляющей поверхностью четвертого порядка<sup>5</sup>. В этом смысле мы вправе считать Декарта основоположником асферической оптики. Указанные выше поверхности получили в дальнейшем название «декартовых овалов».

Второй из указанных выше способов исправления сферической абберации нашел в XVII в. довольно широкое практическое применение в конструкциях крайне длинных телескопов. Польский астроном И. Гевелий построил в Данциге телескоп длиной в 150 футов (около 50 м) и вынужден был соорудить для него специальную башню<sup>6</sup> (рис. 1). Для упрощения технических трудностей, возникающих при постройке таких

<sup>1</sup> *Bibliotheca Mathematica*. Folge 3, B. 10. H. 1, 1910, S. 293.

<sup>2</sup> *Bacon R. Opus Majus*, B. I. Frankfurt-am-Main, 1964, S. 115; B. II, S. 488.

<sup>3</sup> *Leonardo da Vinci*. Codice Arundel, F. 87. См. *Вавилов С. И.* Собр. соч., т. III, М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 244.

<sup>4</sup> *Maurolico Francesco da Messina*. *Photismi de lumine et umbra*. Neapoli, 1611.

<sup>5</sup> *Декарт Р.* Рассуждение о методе с приложениями. Диоптрика, метеоры, геометрия. М., Изд-во АН СССР, 1953, с. 155, 156.

<sup>6</sup> *Hevelius J. Machinae Coelestis*. Dantzig, 1673, p. 379—419.

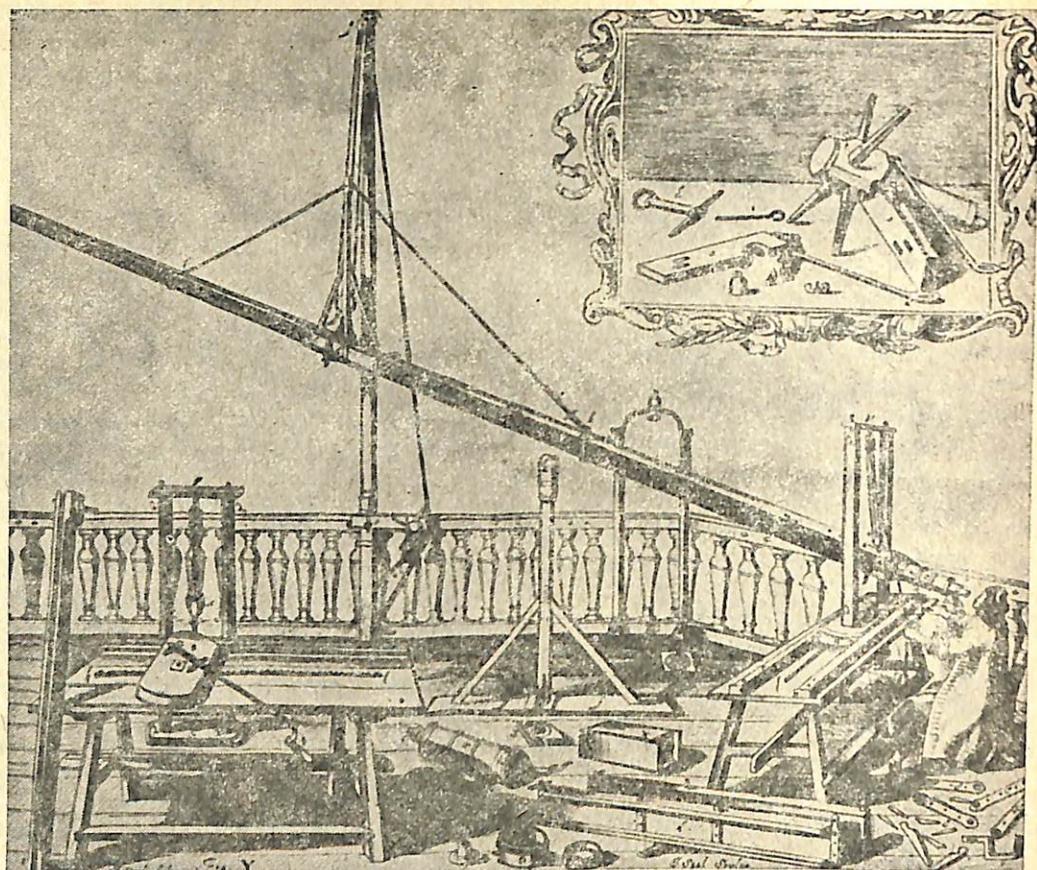


Рис. 1. Телескоп И. Гевелия (1647 г.)

приборов, Х. Гюйгенс предложил «воздушный телескоп» без тубуса, в котором объектив и окуляр были укреплены изолированно друг от друга<sup>7</sup>.

Что же касается хроматической аберрации, то она не была обнаружена ни Гюйгенсом, ни Декартом, ни их предшественниками или современниками. На первый взгляд это может показаться странным: хотя зрительные трубы и микроскопы в XVII в. использовались многими просвещенными людьми того времени, никто из них не обратил внимания на «радужный ореол», бросающийся в глаза при наблюдении звезд и мелких частиц. Объяснить это можно низким качеством изготовления оптических линз (и вообще стекла). Последнее настолько искажало картину изображения, что цветной ореол становился малозаметным.

Дальнейшее развитие теории аберраций оптических систем было связано со стремлением улучшить конструкцию телескопа. Именно этим вопросом занимался Исаак Ньютон в студенческие годы.

В 1669 г. в своих «Лекциях по оптике» он ставит вопрос об аберрациях оптических систем следующим образом: «Изучающие диоптрику воображают, что зрительные приборы могут быть доведены до любой степени совершенства при помощи стекла, если полировкой сообщить ему желаемую геометрическую фигуру. Для этой цели придуманы были разные инструменты для притирания стекол по гиперболическим, а также параболическим фигурам. Однако точное изготовление таких фигур до сих пор никому не удавалось, ибо работали понапрасну. И вот, для того чтобы не тратили далее труд свой на безнадежное дело, осмеливаюсь я предупредить, что если бы даже все происходило удачно, все же полученное не отвечало бы ожиданиям. Ибо стекла, которым придавали бы фигуры наилучшие, какие можно придумать для этой цели, не будут действовать

<sup>7</sup> *Huygens Cr. Oeuvres completes de Cristian Huygens*. Haag, 1916, v. XIII, Fasc. 1/2, p. 84—102.

и вдвое лучше сферических зеркал, полированных с той же точностью. Говорю это не для осуждения авторов-оптиков, ибо все они в отношении намерения своих доказательств высказывались точно и вполне правильно. Однако нечто, и притом очень важное, было оставлено ими для открытия потомкам. Так, я обнаружил в преломлениях некую неправильность, искажающую все. Она вызывает не только недостаточное преломление конических сечений над сферическими фигурами, но и служит причиной того, что сферические фигуры дают много меньше, чем если бы сказанное преломление было однородным»<sup>8</sup>.

Этот вывод определил два основных направления дальнейшей деятельности Ньютона в области технической оптики: попытки расчета и устранения сферической, а главное хроматической аберраций и создание реальной конструкции ахроматического телескопа.

Несомненно, что о существовании хроматической аберрации было известно и до Ньютона. Для ее обнаружения достаточно было посмотреть в зрительную трубу на светящуюся точку. Однако, пишет С. И. Вавилов, «никому до него не приходило в голову связать ее с нечетливостью изображений в трубе, никто не ставил до Ньютона вопроса об ее причине и никто не искал практического выхода в отражательном телескопе. Одна постановка таких вопросов и в таком сочетании подымала Ньютона над всеми оптиками — его современниками»<sup>9</sup>.

В своих «Лекциях по оптике» Ньютон впервые ставит вопрос об определении хроматической аберрации: «Определить для разнородных лучей, падающих на сферу, ошибки, порождаемые неравными преломлениями одинаково падающих лучей»<sup>10</sup>. Им же была определена хроматическая аберрация положения изображения для параксиальных лучей. Вывод формулы хроматической аберрации, который приводит Ньютон в своих «Лекциях», по существу ничем не отличается от выводов в современных курсах оптики. В принятых в настоящее время обозначениях формула Ньютона для определения хроматической аберрации  $\Delta S_1$ , вызываемой одной поверхностью, имеет вид

$$\Delta S_1 = \frac{S_1^2}{n'} \left[ \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{S'} \right) \Delta n' - \frac{\Delta n}{r} \right],$$

где  $\Delta n$  и  $\Delta n'$  — дисперсии первой и второй прозрачных сред.

Далее Ньютон приводит сравнение величин сферической и хроматической аберраций и делает «поучение»: «При помощи сего... можно сопоставить ошибки однородных лучей, происходящие на сферических поверхностях вследствие несоответствия фигуры (сферические аберрации.— В. Г.) с ошибками разнородных (хроматические аберрации.— В. Г.). Поэтому причина того, что телескопы не продвинулись до большего совершенства, не есть несоответствие сферической фигуры, а неоднородность света»<sup>11</sup>.

Кроме формулы для вычисления хроматической аберрации, Ньютон приводит формулу для поперечной сферической аберрации третьего порядка для частного случая, когда луч падает параллельно оптической оси системы (предложение XXXI в «Лекциях по оптике»). Ньютон указывает, что им выведена и формула для общего случая, когда предмет находится на конечном расстоянии. В современных обозначениях эта формула имеет следующий вид:

$$Z = -\frac{S'}{2n'} h^3 n^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{S} \right)^2 \left( \frac{1}{n'S'} - \frac{1}{nS} \right),$$

где  $Z$  — поперечная сферическая аберрация;  $S, S'$  — расстояния от точек пересечения луча с осью до вершины преломляющей поверхности;  $h$  — высота падения луча.

«Современный вывод формулы сферической аберрации, — отмечает С. И. Вавилов, — аналогичен выводу Ньютона и выполняется с теми же пренебрежениями, которые допускает Ньютон. Эти пренебрежения относятся к так называемым „высшим порядкам“ сферической аберрации»<sup>12</sup>.

<sup>8</sup> Ньютон И. Лекции по оптике. М., Изд-во АН СССР, 1946, с. 19, 20.

<sup>9</sup> Вавилов С. И. Собр. соч. М., Изд-во АН СССР, 1956, т. III, с. 315.

<sup>10</sup> Ньютон И. Лекции по оптике. М., Изд-во АН СССР, 1946, с. 134.

<sup>11</sup> Там же, с. 135.

<sup>12</sup> Вавилов С. И. Собр. соч. М., Изд-во АН СССР, т. III, 1956, с. 287.

Ньютоном были также предприняты попытки создания практической конструкции ахроматической системы. В его «Оптике»<sup>13</sup> имеется описание «стеклянно-водяного объектива», состоящего из стеклянных менисков, пространство между которыми заполнено водой. Здесь, однако, Ньютон совершает ошибку, состоявшую в том, что «для просветления» в воду он добавил свинцовый сахар, благодаря чему коэффициент преломления воды настолько приблизился к коэффициенту преломления стекла, что эффекта ахроматизации не возникло. Исходя из этого, Ньютон сделал ошибочный вывод о том, что ча-

стная относительная дисперсия  $\frac{n-1}{\Delta n}$  есть универсальная постоянная, одинаковая для всех прозрачных сред, а потому исправление хроматических aberrаций оптических систем невозможно.

Ошибка Ньютона имела серьезные отрицательные последствия для развития технической оптики. Непререкаемый авторитет Ньютона почти на столетие отодвинул вопрос о возможности создания ахроматических оптических систем. Правда, в 1695 г. Давид Грегор, руководствуясь аналогией с человеческим глазом, где двояковыпуклый хрусталик соприкасается с вогнутовыпуклым стеклом (две линзы с различной относительной дисперсией), предложил строить ахроматические оптические приборы на этом принципе. Однако практически эта идея была осуществлена Честером Холлом и позднее, в 1758 г. Джоном Доллондом путем сочетания двояковыпуклой линзы из кронгласа с вогнутой линзой из флинтгласа.

Эйлер был в числе первых ученых, резко выступивших против утверждения Ньютона о невозможности построения линз, свободных от хроматической aberrации. В 1747 г. он высказал идею о возможности создания ахроматического объектива<sup>14</sup>.

Открытие ахроматических систем обычно связывается с именами Честера Холла и Д. Доллонда. При этом очень часто игнорируются заслуги Л. Эйлера. Сам Эйлер излагал историю ахроматических систем следующим образом: «Наше мнение вскоре же подверглось яростным нападкам со стороны покойного Доллонда, который еще долгое время считал, что доказательство великого Ньютона обосновано настолько прочно, что не может быть ошибочным. Для подкрепления своего мнения он приступил к опытам над преломлением различных прозрачных веществ, в особенности разных сортов стекла. Эти опыты вполне подтвердили мое мнение, и Доллонд принужден был признать свою ошибку. Без сомнения, именно это важное открытие заставило искусного мастера с жаром приняться за усовершенствование обычных линз»<sup>15</sup>.

Воспользовавшись идеей Эйлера, Доллонд в 1758 г. применил для ее реализации два сорта стекла с различными коэффициентами преломления — кронглас и флинтглас. С этого времени начали выпускаться Доллондом его ахроматические телескопы.

Интересно отметить, что в западноевропейской литературе XIX—XX вв. изобретение Доллонда показывается как нечто совершенно новое и независимое от исследований Эйлера. Однако современники Эйлера и Доллонда как в России, так и на Западе относились к этому вопросу совсем иначе. Так, знаменитый английский физик Пристли в своей истории оптики (1772 г.) прямо указывает на то, что Доллонд приступил к своим изысканиям под непосредственным влиянием работ Эйлера<sup>16</sup>. Это же отмечает С. Я. Румовский в книге «Речь о начале и приращении оптики» (1763 г.)<sup>17</sup>, а в статье «Главнейшие изобретения, с некоторых веков в Европе учиненные» прямо указывается: «Утверждаясь на доказательствах г. Эйлера, на мысль пришло г. Доллонду объективные стекла делать из двух родов стекла, известных в Англии под названием флинтглас и кронглас. Первое из них сие отменное имеет свойство, что разных цветов лучи по преломлении больше рассеивает, нежели кронглас или обыкновенное простое стекло»<sup>18</sup>.

<sup>13</sup> Ньютон И. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. М.—Л., Госиздат, 1927, с. 85, 86.

<sup>14</sup> Euler L. Constructio lentium objectivarum ex duplici vitro, quae neque confusionem a figura sphaerica oriundem, neque dispersionem colorum pariant. Petropoli, 1762.

<sup>15</sup> Fuss N. Instruction de taillee etc., 1774. Предисловие Эйлера, с. 3 (об.). См. пер.: Вавилов С. И. Собр. соч. т. III, с. 146.

<sup>16</sup> Priestley J. History and Present state of discoveries relating to Vision, Light and Colours. London, 1772.

<sup>17</sup> Румовский С. Я. Речь о начале и приращении оптики до нынешних времен. СПб., 1763.

<sup>18</sup> Месяцеслов на 1777 г. См. «Собрание сочинений, выбранных из месяцесловов на разные годы». СПб., Изд-во Академии наук, 1787, ч. II, с. 290.

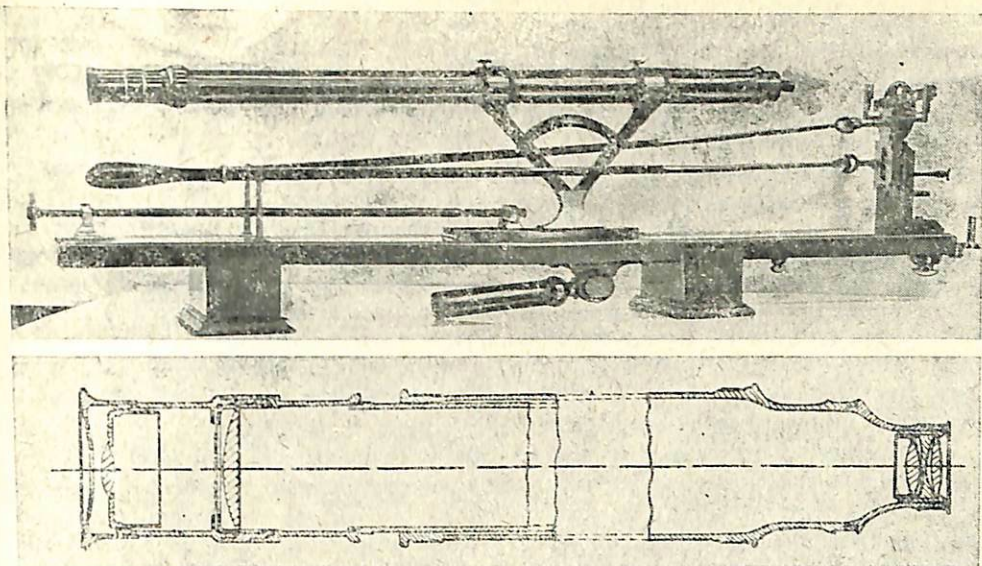


Рис. 2. Ахроматический микроскоп, сконструированный в 1805—1808 гг. немецким оптиком Тидеманом по расчетам Ф. Эйлера (экспонат из коллекции микроскопов Института истории естествознания и техники АН СССР. Ныне экспонируется в Политехническом музее, Москва)

Изобретение Доллонда повлияло в свою очередь на дальнейшие работы Эйлера, особенно связанные с уточнением расчетов ахроматических систем. Эйлером были произведены расчеты сложных ахроматических линз, состоящих из большого числа стекол (до 10 линз). Эти работы нашли свое завершение в фундаментальной трехтомной «Диоптрике» Эйлера<sup>19</sup>, вышедшей в 1769—1771 гг.

Рассматривая центрированную оптическую систему, Эйлер в первом приближении получает известные формулы геометрической оптики. Во втором приближении Эйлер учитывает aberrации — сферическую и хроматическую. При малом входном зрачке эти aberrации являются членами второй степени разложения в ряд по степеням входного зрачка.

Пользуясь полученными им формулами, Эйлер определяет сферическую aberrацию вдоль оптической оси для пучка лучей, идущих из точки на оптической оси, т. е. «продольную сферическую aberrацию». Опираясь на свою теорию, Эйлер пытался изготовить телескопы и микроскопы значительно более совершенные, чем применяемые в то время, причем основное внимание он уделял коррекции названных выше aberrаций, а также получению возможно большего поля зрения.

Несмотря на правильность всех его рассуждений, проверка на практике предположений Эйлером оптических систем не дала ожидаемых результатов. Если бы мы захотели сравнить объективы, рассчитанные Эйлером, с объективами его современников, то обнаружили бы интересный факт. Во всех оптических системах Эйлера сферическая aberrация была хорошо исправлена, но только в одном случае его объектив имел хорошую коррекцию в отношении условия синусов. Все же другие оптические системы, рассчитанные Эйлером, обнаруживали значительные aberrации комы.

Объясняется это тем, что Эйлеру не было известно о роли условия синусов в расчете оптических систем. Он считал, что для получения хорошего изображения достаточно исправления сферических и хроматических aberrаций. Поэтому неудивительно, что объективы Эйлера, несмотря на хорошо исправленные сферические aberrации, все же давали плохое изображение. Это обстоятельство привело впоследствии к недооценке значения работ Эйлера в области развития теории aberrаций оптических систем. Однако путем добавления некоторых простых идей теорию aberrаций Эйлера можно очень

<sup>19</sup> Euler L. Dioptrica. St-Petersbourg, 1769—1771.

легко связать с разработанной во второй половине XIX в. теорией оптических изображений К. Ф. Гаусса<sup>20</sup>.

Кроме определения сферической аберрации для точек объекта, расположенных на оптической оси системы, Эйлер впервые в истории оптики дал и формулы коррекции хроматических аберраций.

В последних разделах III тома «Диоптрики» (1771 г.) он рассматривает несколько типов оптических систем микроскопов с ахроматическим объективом.

К сожалению, эти конструкции оптических систем Эйлера, представляющие выдающийся теоретический интерес, практически осуществлены не были. На то имелось несколько причин, в основном чисто технического порядка: расчеты Эйлера могли дать эффект лишь при абсолютно точном их выполнении (точная центрировка линз, точная выверка расстояний между линзами, наконец, высокая точность изготовления самих линз). Все это с учетом состояния оптической технологии того времени было почти неосуществимо, особенно в отношении точности изготовления линз, имеющих малый диаметр и короткое фокусное расстояние.

Тем не менее оптическая и инструментальная мастерские Петербургской Академии наук успешно занимались конструированием ахроматических микроскопов по указаниям Эйлера и его ученика Н. Фусса. В 1784 г., уже после смерти Эйлера, в Петербургском академиком Ф. Эпинусом был рассчитан и изготовлен первый в мире ахроматический микроскоп<sup>21</sup>. Более поздняя конструкция ахроматического микроскопа, выполненного по расчетам Ф. Эпинуса, показана на рис. 2.

Так заканчиваются первые страницы развития теории аберраций оптических систем. Разработка этой теории не являлась самоцелью, а была вызвана практической необходимостью: астрономы нуждались в телескопах, дающих большое увеличение и высокое качество изображения; в физике, химии и целом ряде других наук росла потребность в высококачественных микроскопах, дающих возможность все глубже проникать в тайны микромира. Однако теория аберрации оптических систем для общего случая сформировалась лишь к концу XIX в.

<sup>20</sup> Габихт В. О работах Леонарда Эйлера в области диоптрики.— «Вопросы истории естествознания и техники», 1973, вып. 4 (45), с. 29—34.

<sup>21</sup> Aepinus F. Description des nouveaux Microscopes, inventes par Mr. Aepinus. St-Petersbourg, 1784.

# Материалы к биографиям ученых и инженеров

## С. И. ВАВИЛОВ И ВАВИЛОВСКИЙ ФИАН \*

Член-корреспондент АН СССР Е. Л. ФЕЙНБЕРГ

При Сергее Ивановиче Вавилове — директоре я проработал 15 лет. Официально зачисленный сотрудником Физического института лишь в 1938 г., я уже в 1935 г., став аспирантом И. Е. Тамма по Московскому университету, попал в ФИАН (куда Игорь Евгеньевич перенес свой еженедельный семинар) и, покоренный атмосферой увлеченности наукой, взаимного доброжелательства, соединенного с тактичной взыскательностью, фактически переселился в институт на Миусах. Но понадобилось еще много лет после смерти Сергея Ивановича, прежде чем в нем прояснилось для меня нечто существенное. О трех составляющих этой личности, о которых, как кажется, не писали или писали недостаточно, я и хочу рассказать в меру своего разумения.

1

Как представляется, Сергей Иванович ощущал, а может быть, и осознавал себя звеном в истории мировой и прежде всего отечественной культуры. Историзм в восприятии и осмыслении культуры встречается не так уж часто. Сергею Ивановичу он был свойствен в высшей степени. Я решаюсь высказать мнение, что он видел историю культуры, как единое стремление человеческого духа к знанию и совершенствованию, единое, несмотря на все отклонения от этой главной линии, обусловленные историческими, национальными и социальными условиями. Он видел нелегкие пути ее становления. Все это раскрывается, в частности, при чтении его книг, статей и выступлений по вопросам истории науки, в значительной мере собранных в третьем томе Собрания его сочинений.

В молодости он написал прекрасные очерки о художественной культуре северных городов Италии, культуре, созданной великими художниками, состоявшими в услужении у всевластных и изредка щедрых правителей. В зрелые годы он перевел с латини «Оптику» Ньютона и опубликовал превосходную его биографию, освещенную пониманием эпохи.

Всю жизнь Вавилов пропагандировал физико-химические исследования Ломоносова, вынужденного для этих исследований выпрашивать время и средства и за одну удачную оду императрице получавшего в награду сумму, в три раза превышавшую его годичное профессорское жалованье<sup>1</sup>.

Но Сергей Иванович видел, что при всех странностях и трудностях судеб культуры она составляет гордость человечества, и сам писал о ней, с трудом сдерживая восхищение. Он чувствовал себя наследником ее прошлого, глубоко и лично ответственным за ее будущее.

Ни по крови, ни по социальной принадлежности, ни по условиям воспитания он не был потомком Пушкина или Державина, Ньютона или Эйлера. Но в кабинете прези-

\* Сокращенный текст статьи, публикуемой в сборнике «Сергей Иванович Вавилов». Под ред. И. М. Франка. Изд. 2-е. ФИАН — Физический институт им. П. Н. Лебедева АН СССР.

<sup>1</sup> См. очерк П. Л. Капицы в книге: Капица П. Л. Эксперимент. Теория. Практика. Изд. 2-е. — М.: Наука, 1977, с. 255—272.