

КЛАССИКИ ФИЗИКИ



ХРИСТИАН
ГЮЙГЕНС

УЧПЕДГИЗ • 1959



КЛАССИКИ ФИЗИКИ



И. Н. ВЕСЕЛОВСКИЙ

ХРИСТИАН
ГЮЙГЕНС



ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УЧЕБНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ПРОСВЕЩЕНИЯ РСФСР
Москва 1959



I

Христиан Гюйгенс — выдающийся ученый XVII в. Он занимался математикой, механикой, оптикой, оставил по себе память в астрономии.

В год рождения Гюйгенса (1629) исполнилось двадцать лет с той поры, когда после долгой почти сорокалетней борьбы феодальная и католическая Испания признала, наконец, официально независимость протестантской Голландии, первого государства нового времени, в котором буржуазия добилась господствующего положения.

В XVI в. абсолютистская Испания представляла огромную силу. Она обладала великолепной армией: храбрым офицерским составом и лучшей в Западной Европе пехотой, при помощи которой она одержала в итальянских войнах победу над Францией и овладела или непосредственно, или через вассальных государей всей Италией. Было время, когда Филипп II, как муж Марии Тюдор, пытался стать королем Англии и прочил свою дочь Изабеллу на французский престол. В распоряжении Испании была такая страшная сила, как католическая церковь и орден иезуитов, который ни перед чем не останавливался в борьбе за торжество католицизма. Жертвой убийств пали Генрих III французский, Генрих IV, глава голландских протестантов Вильгельм Оранский. На службе Испании были такие замечательные полководцы, как Александр Фарнезе Пармский, сумевший использовать благоприятную политическую обстановку и отторгнуть всю южную часть Нидерландов — современную Бельгию.

Независимость Голландии в известной степени спасло то обстоятельство, что Филипп II в многочисленных войнах истощил силы Испании.

Героическую самоотверженную борьбу вел народ Нидерландов против испанского абсолютизма и феодально-католической реакции.

Смелые «морские гезы» нападали на испанские суда по всему побережью (и не только по побережью) Атлантического океана. Городское население шло на любые жертвы в борьбе за независимость: хорошо известна героическая защита Лейдена, в честь которой в городе был основан университет.

В результате упорной борьбы Испании пришлось отказаться от мысли покорения Голландии и признать в 1609 году ее независимость. Здесь интересно отметить, что голландские войска, которые были не в силах справиться в открытом поле с испанской пехотой, перешли к другим формам войны, широко используя инженерное искусство.

Большую роль в этом отношении сыграл младший сын Вильгельма Оранского принц Мориц. Вокруг него организовалась крупная инженерная школа, во главе которой стал крупный механик Симон Стевин (1548—1620) из Брюгге, один из создателей современной статики (ему принадлежит правило силового треугольника, установление условий равновесия сил на наклонной плоскости, методы определения усилий в веревках, а также работы в области гидростатики).

В Голландии появилась целая плеяда замечательных математиков. Среди них надо отметить талантливого Виллеброда Снеллия (1580—1626), открывшего закон преломления света и установившего употребляющуюся и до сих пор методику градусных измерений при помощи измерения ряда треугольников, так называемой триангуляции, затем Адриана Меция (1571—1635), давшего для π числовое значение $\frac{355}{113}$, Лудольфа Ван-Цейлена (1539—1610), вычислившего π с еще большим количеством десятичных знаков (так называемое Лудольфово число).

На началах новой военной науки была организована армия, которая стала настоящей военной школой для соседних стран. В частности, для французской молодежи служба в голландских войсках стала настоящей

модой, чрезмерное увлечение которой французские писатели даже немного осмеивали.

Но не только военным искусством славилась Голландия того времени. Расположенная в устье Рейна и его притоков, которые служили основными торговыми путями Центральной Европы, и обладая, кроме того, широко развитой береговой линией она самой природой была предназначена к тому, чтобы быть основным торговым и промышленным центром Атлантического побережья Европы. Еще в то время, когда Нидерланды входили в состав монархии Карла V и Филиппа II, доходы с них составляли львиную долю поступлений в испанскую казну. Нидерланды давали больше денег, чем вся Испания и Италия, взятые вместе. После открытия Америки торговля Голландии еще больше усилилась. Это потребовало более широкого развития судостроения и кораблевождения, что в свою очередь повело к дальнейшему развертыванию астрономических и математических исследований.

Без высокого развития инженерного искусства было невозможным даже самое существование Голландии. Большая часть территории страны была расположена ниже уровня моря: приходилось строить огромные плотины, шлюзы, каналы, осушать затопляемые местности и буквально отвоевывать у моря нужную для жизни территорию. Для выкачивания воды служили бесчисленные ветряные мельницы. Техника проникала даже в сельское хозяйство.

Подъем в производстве и торговле сопровождался необыкновенным расцветом великолепного искусства, давшего миру Рембрандта, Рубенса, Ван-Дейка, не говоря уже о множестве других прекрасных художников.

В первой половине XVII в. Голландия была не только самой просвещенной, но и самой свободной страной Европы. Печатные станки Голландии печатали книги, которые в силу своего прогрессивного характера не могли появиться ни в одной другой европейской стране. В Голландии находили приют свободомыслящие люди всех вероисповеданий; в Лейденском университете сидели в аудиториях рядом студенты — французы и голландцы, католики и протестанты, и такое соприкосновение с «еретиками» никого не смущало. Не нужно забывать, что в это самое время в Германии бушевала Тридцатилетняя война,

в которой шло взаимное истребление католиков и протестантов, а в Италии и в Испании инквизиция душила все ростки научного мышления (процесс Галилея в 1633 году). Только в пределах Голландии могла свободно развиваться деятельность такого философа и математика, каким был Ренэ Декарт (1596—1650), первый положивший философские обоснования науки нового времени и того материалистически-механистического мировоззрения, которое существовало в передовой науке вплоть до конца XIX столетия.

II

Нидерландская революция — первая из буржуазных революций новой истории — отличалась некоторыми особенностями. Поскольку борьба велась против чужестранного владычества, то в борьбе против Испании участвовало и голландское дворянство. Это обусловило довольно своеобразное строение нового государства. Во главе государства стоял пожизненный штатгальтер, который принадлежал к Оранскому княжескому дому. Первым штатгальтером был Вильгельм Оранский, вторым — его сын Мориц. Новому государству служили и голландские дворяне. Одним из таких дворянских родов был и род Гюйгенсов.

Дед маленького Христиана, тоже Христиан (в честь него Гюйгенс и получил свое имя), был секретарем Вильгельма I Оранского, затем секретарем Государственного Совета при принце Морице, которого он сопровождал в походах. Во время испанской осады Флиссингена капитан корабля Горн по договоренности с Морицем притворно перешел на сторону испанцев и в качестве заложника оставил им своего сына, который содержался в Лондоне у испанского посла Мендосы. В решительный момент, когда Горну нужно было сбросить маску, сын его был похищен Христианом Гюйгенсом и после больших приключений был доставлен в Голландию и возвращен отцу.

Сыном этого Христиана был отец Гюйгенса Константин (1596—1687), тоже служивший Оранскому дому сначала в качестве секретаря штатгальтера (с 1625 года), а с 1630 года советником Вильгельма II и Вильгельма III Оранских. Он был хорошо известен и вне Голландии. Король Яков I английский возвел его в сан рыцаря, а Лю-

довик XIII французский пожаловал ему орден св. Михаила. Константин Гюйгенс обладал великолепным образованием: знал языки и литературу многих народов и различных эпох и сам писал поэтические произведения по-латыни и по-голландски. Он знал также музыку и живопись, был тонким и остроумным человеком, обладал также и научной любознательностью: интересовался математикой, механикой и оптикой. Среди его друзей было много замечательных людей.

В их числе был и знаменитый Декарт, для которого семья Гюйгенсов была в Голландии самой близкой. Влияние Декарта было очень сильно в кругу Константина Гюйгенса и отразилось также в большой степени на мировоззрении его гениального сына. В связи с этим краткая характеристика Декарта является совершенно необходимой для правильного понимания формирования мировоззрения Христиана Гюйгенса.

Ренэ Декарта (1596—1650), или Картезия (Cartesius — латинизированная форма для Descartes), справедливо называют первым человеком нового времени, мировоззрение которого в той или другой степени влияло на образ мышления ученых трех последующих веков. В эпоху Декарта наука характеризовалась двумя крайностями. С одной стороны, был широко развит культ авторитетов — Аристотеля и священного писания. С другой стороны, умы, разочаровавшиеся в схоластических словопрениях, вообще отказывались от веры в науку и предавались мистическим учениям: именно XVI в. был полон астрономическими, алхимическими и магическими писаниями, причем мистические настроения владели даже умами таких людей, как гениальный Кеплер. Задачей Декарта была борьба против слепой веры в авторитет, за утверждение достоверности научного знания.

Декарт видел задачу науки не в комментировании классических произведений древних авторов, но в получении новых знаний путем опыта. Декарт не очень любил читать книги ученых авторов: если излагаемый предмет интересовал его, то он пытался получить соответствующие результаты самостоятельно. Он искал истину не в книгах, но в путешествиях, в общении с людьми и в многочисленных экспериментах. Занимаясь физиологией, он производил многочисленные рассечения животных. В своей физике и механике он старался соединять теоре-

тическое познание с практическим искусством, и, наоборот, результаты физических и механических опытов подвергал математической обработке. В области математики Декарт вместе с Ферма положил начало аналитической геометрии, которая исследовала свойства геометрических образов при помощи алгебраических вычислений.

Во время осады города Бреды Константин Гюйгенс попросил Декарта изложить основы теории механических машин. Декарт отозвался на это письмом, содержащим математически разработанный трактат механики. В области механики Декарту принадлежит установление первого закона механики (всякое тело, на которое не действуют внешние силы, находится в покое или совершает прямолинейное равномерное движение)¹.

Далее Декарту принадлежит введение понятия о количестве движения, под которым понимается произведение массы движущегося тела на его скорость. Разница с современными представлениями заключается в том, что с понятием количества движения Декарт не соединял представления о направлении, рассматривая, как мы сказали бы, только его абсолютную величину. Ошибка Декарта была, как мы увидим ниже, исправлена Гюйгенсом. Установив понятие о количестве движения, Декарт формулировал для него закон сохранения (общая величина количества движения мира есть величина постоянная).

В области оптики Декарту принадлежит установление закона преломления света (отношение синусов угла падения и угла преломления есть величина постоянная), что было сделано им независимо от Снеллия и не в той форме, как это было у последнего. Исходя из установленного значения коэффициента преломления для воды, Декарт дал математическую теорию радуги, объясняя ее отражением и преломлением света в капельках воды, взвешенных в воздухе. Занимался также Декарт и определением наилучшей формы поверхностей оптических стекол, придя к выводу, что с оптической точки зрения наилучшей формой поверхности будет гиперболическая. Он был сильно задет тем, что друг его Константин Гюй-

¹ Обычно установление закона инерции приписывают Галилею, но это неверно, как можно убедиться из внимательного чтения сочинений Галилея — «Диалог о двух системах мира» и «Беседы о двух новых науках» (оба произведения существуют в русском переводе).

генс не совсем уверенный в правильности его теории склонялся к обычной сферической форме оптических стекол. Не желая огорчать Декарта, Гюйгенс посоветовал ему заказать гиперболическое стекло у одного амстердамского шлифовальщика, но дело расстроилось ввиду отсутствия технически подходящей машины для обработки поверхности такого стекла.

Но в особенности важной была введенная Декартом идея об эволюции мира, постепенном его развитии. Эта идея была выражена Декартом в его трактате «О мире», целью которого было дать новую механическую картину мира. Учение Декарта о системе мира, его космология, было тесно связано с Декартовой теорией материи. Декарт отрицал возможность пустоты. По его представлениям вся Вселенная была заполнена материей, находящейся в вихревом движении. При помощи этих вихрей Декарт объяснял круговые движения планет вокруг Солнца. Что касается комет, то Декарт рассматривал их как тела, которые могут переходить из одного «мира» в другой, т. е. из области одного вихря в область другого. Наша солнечная система была, по мнению Декарта, лишь одним миром среди других. Космология Декарта была универсальной: развитие шло от образования основных видов материи (трех элементов различной степени тонкости), участвовавших в вихревом движении, затем к образованию небесных тел и Земли, появлению органической жизни на ее поверхности и, наконец, развитию человека. Богу в этом процессе предоставлялась лишь скромная роль создания материи, развитие которой шло после этого вполне самостоятельным путем.

III

У Константина Гюйгенса было четыре сына: Константин, Христиан, Лодевик, Филипп, и одна дочь — Сузанна. Из них особенное наше внимание, кроме родившегося в 1629 году Христиана, должен привлечь старший его брат Константин (1628—1697), работавший вместе с Христианом над конструкцией астрономических труб, а в дальнейшем пошедший по административно-политической части и вместе со своим отцом служивший в качестве секретаря у Вильгельма II и Вильгельма III Оранских. Он вос-

питывался вместе с Христианом, причем начертанная их отцом программа воспитания обоих братьев нам хорошо известна.

Уже восьми лет от роду Христиан выучил латинский язык, знал четыре действия арифметики вместе с тройным правилом и учился пению. Девяти лет Христиан познакомился с географией и началами астрономии так, что умел определять время восхода и захода Солнца во все времена года. Десяти лет Христиан выучился латинскому стихосложению и игре на скрипке, одиннадцати лет он познакомился с игрой на лютне, а двенадцати лет он уже знал основные правила логики.

Когда отцу приходилось бывать в походах, то воспитание поручалось двум учителям — профессору Миркинию и Генриху Бруно. Последнего мы хорошо можем представить себе по письмам, которые тот два раза в месяц посылал отцу с отчетом об успехах своих питомцев. Бруно был субдиректором латинского колледжа в Горне. Письма его идут начиная с 24 мая 1639 года.

В 1641 году Бруно пишет отцу Христиана: «Я вижу и почти завидую замечательной памяти Христиана». В это время оба брата учат греческий язык, а также французский.

После греческого, французского и итальянского языков, а также игры на клавесине Христиан перешел к механике, ставшей его любимым занятием. Он конструирует различные машины, в частности, самостоятельно делает себе токарный станок. В 1643 году Бруно пишет отцу: «Я признаюсь, что Христиана нужно назвать чудом среди мальчиков... Он разворачивает свои способности в области механики и конструкций, делает машины удивительные, конечно, но вряд ли нужные. И вы не ждете, а также и государство не желает..., чтобы из него получился кузнец, а не бог Меркурий».

Еще два года, и Христиан обучается математике, верховой езде и танцам. Сохранился рукописный математический курс, составленный для него выдающимся математиком, другом Декарта, Франциском Схоутенем¹. В этом курсе излагаются начала алгебры (уравнения

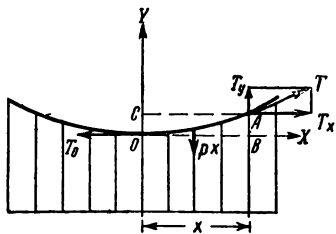
¹ Ф. Схоутен (1616—1661), сын профессора математики, с 1646 года сам профессор инженерной школы при Лейденском университете, автор «Трактата о конических сечениях» (1646 г.) и нескольких книг «Математических упражнений».

первой степени) и геометрии, затем идут неопределенные уравнения, заимствованные из «Арифметики» Диофанта. После этого рассматриваются вычисления с иррациональными выражениями, извлечение квадратного и кубического корней и, наконец, теория алгебраических уравнений высших степеней, в частности кубических; изложение ведется по Декарту, причем почти дословно переписывается третья книга его «Геометрии». Затем идут приложения алгебры к геометрии, составляются уравнения геометрических мест (соответствующие примеры берутся у Паппа Александрийского). Заканчивается курс кратким обзором (4 страницы) конических сечений, заимствованным из «Геометрии» Схоутена, а также задачами на проведение касательных к различным кривым методами Декарта и Ферма и теорией максимумов и минимумов по Ферма.

Шестнадцати лет Христиан вместе с братом поступает в Лейденский университет для изучения права и одновременно обучается математике у Схоутена, который посылает первые его математические работы Декарту на отзыв. Последний с похвалой отзывается о «математических изобретениях» юного Христиана. «Хотя он и не вполне получил то, что ему нужно, но это никоим образом не странно, потому что он попытался найти вещи, которые еще никому не удавались. Он принялся за это дело таким образом, что я уверен в том, что он сделается выдающимся ученым в этой области». В это время Гюйгенс изучает Архимеда, «Конические сечения» Аполлония, оптику Вителло и Кеплера, а также «Диоптрику» Декарта, астрономию Птолемея и Коперника и, наконец, механику Стевина. В последней Гюйгенс встречает утверждение, что фигура равновесия нити, свободно подвешенной между двумя точками, будет параболой, и доказывает неправильность этого положения.

Если рассмотреть этот вопрос с современной точки зрения, то приходится сказать, что параболическая форма нити получается в том случае, когда нагрузка, приходящаяся на погонный метр в горизонтальном направлении, будет одинакова. Это имеет место для случая висячего моста. Полотно моста висит при помощи вертикальных тяжей к тросу, концы которого прикреплены к колоннам, находящимся по обеим сторонам моста.

Пусть приходящаяся на единицу длины по горизонтали нагрузка равна p . Возьмем начинающуюся в наименьшей точке O часть OA нити, горизонтальная проекция которой OB равна x (фиг. 1)



Фиг. 1

Вес этой части нити будет равен px . Он уравновешивается двумя силами натяжения нити, а именно горизонтальной T_0 , приложенной в наименьшей точке O нити, и T — в конечной точке A . Последнюю силу разложим на две составляющие T_x и T_y , направленные по горизонтали и по вертикали. Нетрудно видеть, что

$$T_x = T_0 \quad T_y = px,$$

т. е. весу рассматриваемой части нити. Обозначим длину AB через y и попробуем найти соотношение между абсциссой x и ординатой $AB=y$. Составим уравнение моментов сил относительно точки O . По стрелке часов будут вращать: 1) вес px части OA , имеющий плечом половину OB , или $\frac{x}{2}$, и 2) составляющая $T_x = T_0$ натяжения нити в точке A , плечо которой $OC = AB = y$. Против стрелки часов будет вращать сила $T_y = px$, имеющая своим плечом $OB = x$. При равновесии сумма моментов сил, вращающих вокруг O по стрелке часов, равна сумме моментов сил, вращающих против стрелки часов, т. е.

$$px \frac{x}{2} + T_0 y = px \cdot x,$$

откуда

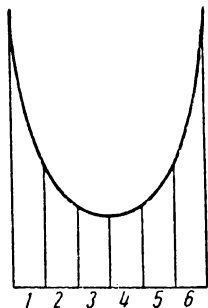
$$y = \frac{p}{2T_0} x^2.$$

Это уравнение параболы с вершиной в точке O и с осью, направленной по Oy .

Таким образом, мы видим, что точная форма параболы получается при одинаковых нагрузках на единицу длины по горизонтали. Если свободновисящая нить расположена очень полого, то параболическая форма нити будет приблизительно сохраняться. В самом же общем случае это будет неверно. Действительно, при очень

большом провисании нити на одинаковые горизонтальные отрезки 1, 2, 3, 4, 5, 6 (фиг. 2) приходится очень различные веса отрезков нити (мы, конечно, считаем нить однородной, т. е. такой, что веса, приходящиеся на одинаковые по длине отрезки самой нити, будут равными). В этом случае нить расположится по так называемой *цепной линии*.

Очень интересное явление в научной жизни первой половины XVII в. представлял Марин Мерсенн (1588—1648). Мерсенн был монахом францисканского ордена, но, как это не редко встречалось в то время даже среди католиков, не разделял мнения инквизиционного трибунала о запрещении Коперниковой системы мира. Почти через год после осуждения Галилея Мерсенн издает французский перевод «Механики» Галилея. Во втором издании в



Фиг. 2

1635 году Мерсенн в предисловии заявляет, что «не существует никакого естественного доказательства, которое противоречило бы допущению как неподвижности, так и движения Земли». Затем Мерсенн помещает краткое изложение галилеевских «Диалогов о двух системах мира» с аргументами в пользу движения Земли и вслед за этим без всяких комментариев печатает французский перевод текста инквизиционного приговора, как бы предоставляя окончательное суждение читателю.

Будучи на восемь лет старше Декарта, он воспитывался в одной школе с ним и был большим его другом.

Сам Мерсенн не был выдающимся ученым, но, находясь в постоянной переписке с большинством замечательных людей своей эпохи, он всегда был в курсе всех научных достижений его времени. Константин Гюйгенс называл его обладателем «колоссальной, но непереваренной эрудиции». В своих письмах Мерсенн сообщал ученым о новейших открытиях, наиболее интересных математических и механических задачах. Его обширная переписка заменяла отсутствовавшие в то время научные журналы.

Мерсенн переписывался с Константином Гюйгенсом по вопросам артиллерии, а Христиану посылал интересные математические и механические задачи. В частности,

из его писем Гюйгенс впервые познакомился с циклоидой и центром качания физического маятника. Последняя задача, с которой теоретически не справился даже сам Декарт, была позднее в 1664 году полностью разрешена Гюйгенсом. Узнав о критике Гюйгенсом параболической формы нити, свободно подвешенной между двумя точками, Мерсенн сообщил ему, что та же самая ошибка была сделана и самим Галилеем, и попросил его прислать полное доказательство. Интересен ответ Гюйгенса: «Когда я нахожу что-нибудь новое в области математики, я не записываю это сразу же: мне вполне достаточно, что я могу сделать это, когда я захочу, или когда у меня попросят дать доказательство; таким образом, в этом деле с нитью я ничего не записал, если не считать одного или двух предложений». Тем не менее полный текст доказательства, изложенный по всем правилам геометрического искусства с определениями, аксиомами и рядом предложений, Гюйгенс все-таки Мерсенну послал.

В то же самое время Гюйгенсу пришлось еще раз вторгнуться в область галилеевых исследований. В 1646 году в руки Гюйгенса попала книга некоего Лобковича (1606—1682), бывшего профессором богословия испанского университета в Алькала. В этой книге Лобкович отвергал установленные Галилеем законы падения тяжелых тел и заменял их другими, установленными им опытным путем. Эти законы сводились к тому, что пути, проходимые падающим телом в 1-ю, 2-ю, 3-ю и т. д. единицы времени, будут относиться как ряд последовательных натуральных чисел: 1, 2, 3, 4 и т. д. Об этом законе Гюйгенс писал: «Он (Лобкович.— *И. В.*) утверждает, что его закон справедлив, хотя он не имеет никакого основания, но только лишь опыт, который, я полагаю, часто обманывает, что в данном случае и произошло».

Что касается законов падения Лобковича, то Гюйгенс доказывает несправедливость последних при помощи рассуждения, сущность которого сводится к следующему. Пусть закон Лобковича справедлив. Тогда пути, пройденные в последовательные единицы времени, будут относиться как 1 : 2 : 3 и т. д. Предположим для простоты, что пути будут равны 1, 2, 3 и т. д. единицам длины. Для этого достаточно в качестве последней выбрать длину, проходимую падающим телом в первую единицу времени, положим в первую секунду, после начала паде-

ния. В таком случае весь путь, пройденный телом, будет равняться сумме

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 +$$

где каждое слагаемое представляет путь, пройденный в последовательные секунды после начала движения. Но ничто не мешает нам выбрать в качестве единицы времени величину вдвое большую, две секунды. В таком случае пути, проходимые в последовательные единицы времени, будут:

$$1 + 2 = 3, \quad 3 + 4 = 7, \quad 5 + 6 = 11,$$

что никоим образом не вытекает из закона Лобковича, который требует, чтобы соответствующие пути были 3, 6, 9 и т. д. Полученное противоречие уничтожает возможность существования подобного закона. Продолжая свои исследования, Гюйгенс, еще не знакомый с «Беседой о двух новых науках» Галилея, устанавливает правильный закон падения, т. е. что пути, проходимые в 1-ю, 2-ю, 3-ю и т. д. единицы времени, должны относиться как ряд последовательных нечетных чисел: 1, 3, 5 и т. д., т. е. приходит к закону, установленному Галилеем.

Заканчивая отчет Мерсенну о своих работах, Гюйгенс пишет:

«Я решил попробовать доказать, что тяжелые тела, брошенные вверх или в сторону, описывают параболу, но тем временем мне попала в руки книга Галилея об ускоренном движении естественном или насильственном; когда я увидал, что он доказал и это, и многое другое, то я уже не захотел писать Илиаду после Гомера».

IV

После двух лет, проведенных в Лейдене, братья расходятся: Константин идет помогать отцу и начинает работать у принца Фредерика-Генрика, а Христиан вместе с младшим братом Лодевиком отправляется в Бреду учиться в «Оранской коллегии», основанной принцем Морицем после взятия Бреды (по-видимому, у штатгальтеров Оранского дома было обычаем отмечать военные успехи основанием высших учебных заведений).

В Бреде оба брата живут на пансионе у профессора юриспруденции Даубера. Отец определенно готовил Христиана тоже к государственной деятельности, но, по-видимому, последняя не очень соблазняла юношу. По крайней мере, когда по окончании двухлетнего курса учения в Бреде Гюйгенс возвратился в Гаагу для прохождения практики в местных судах, он писал брату Константину: «Я надеюсь, что это не будет слишком продолжительным». По обычаю того времени образование заканчивалось путешествием, и отец отправляет Христиана в Голштинию с посольством принца Генриха Нассаусского. Но Гюйгенс с большим удовольствием поехал бы дальше, в Швецию к Декарту, жившему там у дочери Густава-Адольфа королевы Христины Шведской. К счастью, дипломат в Фленсбурге оказался ненужным, и Христиан получил свободу для научной деятельности. В начале 1650 года он снова возвращается в Гаагу, где сразу заболевает, по-видимому, туберкулезом желез. Вообще Христиан здоровьем не отличался, и в письмах его постоянно встречаются жалобы на преследующую его головную боль, продолжающуюся иногда по месяцу и больше и не позволяющую ему вести интенсивные научные занятия.

Любимым автором Гюйгенса был Архимед.

В XVI в. Архимеду более удивлялись, чем читали его произведения, но в XVII в. (начиная с Галилея, высоко ценившего гениального сиракузца) Архимеда начинают уже понимать.

Первые самостоятельные работы Гюйгенса, как появившиеся, так и не появившиеся в печати, написаны под влиянием Архимеда. Отец, тоже любивший Архимеда, называл Христиана «своим Архимедом».

В духе Архимеда двадцатилетний Христиан написал книгу о теории плавания тел.

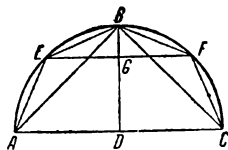
Позднее, в 1654 году, Гюйгенс блеснул еще одним поразительным сочинением в духе Архимеда, а именно: «О квадратуре круга». Это сочинение, имеющее элементарный характер, открывает в истории квадратуры круга совершенно новый период, представляя определенный прогресс по сравнению с архимедовым сочинением «Измерение круга». Действительно, свою величину для π , а именно:

$$3 \frac{1}{7} < \pi < 3 \frac{10}{71},$$

Архимед нашел при помощи вычисления периметра 96-угольника, тогда как методом Гюйгенса его можно было получить из рассмотрения только 12-угольников и 6-угольников.

Вначале Гюйгенс доказывает две леммы (фиг. 3):

1°. Если в сегмент круга впишем равнобедренный треугольник и в оставшиеся сегменты такие же, то первый треугольник будет меньше учетверенной суммы двух последних.



Фиг. 3

Так как $AE = EB$ по построению, то

$$\begin{aligned} AB &< 2 AE, \\ AB^2 &< 4 AE^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Если обозначим через d диаметр круга, то на основании известной теоремы об отрезках диаметра:

$$\begin{aligned} AB^2 &= BD \cdot d, \\ AE^2 = EB^2 &= BG \cdot d. \end{aligned}$$

Отсюда получается после деления

$$AB^2 : AE^2 = BD : BG.$$

Сравнивая это с неравенством (1), получаем:

$$BD < 4 BG. \quad (2)$$

Теперь из равенства $AB = EF$ заключаем:

$$AC < 2 EF. \quad (3)$$

Площадь треугольника ABC будет равна

$$\triangle ABC = \frac{1}{2} AC \cdot BD,$$

или, если воспользоваться равенствами (2) и (3):

$$\triangle ABC < \frac{1}{2} \cdot 2 EF \cdot 4 BG = 8 \triangle EBF.$$

Но так как $\triangle EBF = \triangle AEB = \triangle BFC$, то последнее равенство дает нам:

$$\triangle ABC < 4(\triangle AEB + \triangle BFC).$$

2°. Если на основании сегмента (фиг. 4) построить треугольник AEC , стороны которого будут касательными

к окружности, и в вершине сегмента провести третью касательную FG , то треугольник EFG будет больше половины вписанного в сегмент равнобедренного треугольника ABC .

Так как $EF > FB = FA$, то

$$AE < 2EF. \quad (1)$$

Поскольку треугольники AEC и FEG подобны, то их площади относятся как квадраты сходственных сторон:

$$\triangle AEC : \triangle FEG = AE^2 : EF^2.$$

Но из равенства (1) имеем:

$$AE^2 < 4EF^2,$$

и, следовательно, $\triangle AEC$ будет меньше учетверенного $\triangle EFG$.

Далее площади треугольников ABC и AEC , имеющих общее основание, относятся как высоты, или как стороны AF и AE . Но $AF < FE$ и, следовательно, меньше половины AE . Таким образом, треугольник ABC будет меньше половины треугольника AEC . Теперь из неравенств:

$$\triangle ABC < \frac{1}{2} \triangle AEC \text{ и } \triangle AEC < 4 \triangle EFG,$$

получаем:

$$\triangle ABC < 2 \triangle EFG.$$

3°. Всякий круговой сегмент, меньший полукруга, имеет ко вписанному в него равнобедренному треугольнику отношение большее, чем 4 : 3.

Доказательство Гюйгенса почти точно воспроизводит ход мыслей Архимеда при доказательстве аналогичной теоремы в «Квадратуре параболы». Мы можем провести это доказательство значительно проще, используя теорему о сумме бесконечно убывающей геометрической прогрессии.

Впишем в рассматриваемый сегмент равнобедренный треугольник ABC , в оставшиеся сегменты тоже равнобедренные треугольники AEB и BFC (фиг. 3). Если мы будем продолжать такие построения до бесконечности, то сумма всех таких треугольников будет равна в пределе площади сегмента ABC .

$$\begin{aligned} \text{Сегмент } ABC &= \triangle ABC + (\triangle AEB + \triangle BFC) + \\ &+ (\text{тр-ки на } AE, EB, BF, FC) + \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Но согласно лемме 1° мы имеем:

Сумма $\triangle AEB$ и $\triangle BFC > \frac{1}{4} \triangle ABC$.

Сумма треугольников на $AE, EB, BF, FC > \frac{1}{4}$ суммы

$\triangle AEB$ и $\triangle BFC$, или больше $\frac{1}{16} \triangle ABC$.

Продолжая так далее, можем написать:

Сегмент $ABC > \triangle ABC + \frac{1}{4} \triangle ABC + \frac{1}{16} \triangle ABC + \dots$

Стоящая в правой части сумма будет

$$\triangle ABC \cdot \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{16} + \dots\right) = \triangle ABC \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{4}} = \frac{4}{3} \triangle ABC.$$

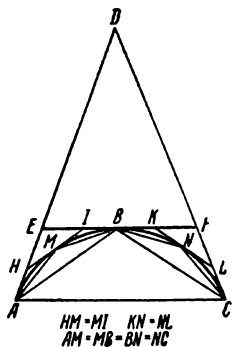
Таким образом, площадь сегмента будет больше $\frac{3}{4}$ площади $\triangle ABC$ и окончательно

$$\frac{\text{Сегм. } ABC}{\triangle ABC} > \frac{4}{3}.$$

Аналогично на основании леммы 2° доказывается следующая теорема:

4°. *Всякий сегмент круга меньше двух третей треугольника с тем же основанием и со сторонами, касательными к окружности сегмента.*

Впишем в сегмент ABC равнобедренный $\triangle ABC$ и опишем около него $\triangle ADC$ (фиг. 5). В вершине B проведем касательную EBF , а в серединах M и N дуг AB и BC проведем до пересечения с AD и CD касательные HMI и KNL . Если мы будем продолжать это построение сколь угодно далеко, то сумма внешних треугольников DEF, EHI, KLF и т. д. будет иметь пределом разность между площадями $\triangle ADC$ и сегмента, а сумма внутренних треугольников ABC, AMB, BNC и т. д. будет стремиться к площади сегмента ABC .



Фиг. 5

На основании леммы 2° мы имеем:

$$\triangle EDF > \frac{1}{2} \triangle ABC$$

$$\triangle EHI > \frac{1}{2} \triangle AMB$$

$$\triangle EHI + \triangle FKL > \frac{1}{2} (\triangle AMB + \triangle BNL).$$

Суммируя аналогичные неравенства и переходя к пределу, получаем:

$$\triangle ADC - S_{\text{сегм.}} > \frac{1}{2} S_{\text{сегм.}}$$

$$\triangle ADC > \frac{3}{2} S_{\text{сегм.}}$$

$$S_{\text{сегм.}} < \frac{2}{3} \triangle ADC.$$

Следующие две теоремы относятся ко всему кругу.

5°. *Круг больше вписанного в него правильного многоугольника, сложенного с третьей частью разности между этим многоугольником и многоугольником с вдвое меньшим числом сторон.*

Пусть в круг (фиг. 6) вписан квадрат и восьмиугольник. Разность между площадями этих многоугольников равна четырем треугольникам ADB . На основании предложения 3° можем написать

$$\text{Сегмент } ADB > \frac{4}{3} \triangle ADB.$$

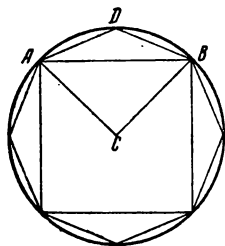
Если мы вычтем из обеих частей $\triangle ADB$, то получим, что два сегмента, построенные на хордах AD и DB , будут больше одной трети $\triangle ADB$.

Если теперь мы прибавим к обеим частям по четырехугольнику $CADB$, то получим:

$$\text{Сектор } CADB > \text{четырехугольника } CADB + \frac{1}{3} \triangle ADB.$$

Умножив обе части этого равенства на четыре, получим:

$$S_{\text{круга}} > S_8 + \frac{1}{3} (S_8 - S_4),$$

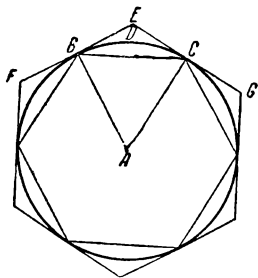


Фиг. 6

где под S_8 и S_4 мы понимаем площади восьмиугольника и четырехугольника.

6°. *Круг меньше двух третей описанного правильного многоугольника вместе с третью подобного же вписанного.*

Пусть S_{BC} и S_{EF} будут площади вписанного и описанного многоугольников (фиг. 7). Согласно предложению 4° сегмент BDC будет меньше $\frac{2}{3}$ треугольника BEC . Если мы прибавим к обеим частям этого неравенства по $\triangle ABC$, то получим:



Фиг. 7

$$\text{Сектор } ABDC < \triangle ABC + \frac{2}{3} \triangle BEC.$$

Если мы просуммируем все такие неравенства для всех сторон вписанного многоугольника, то будем иметь:

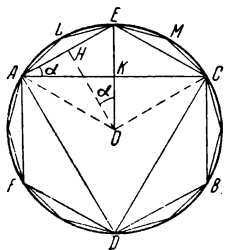
$$S'_{\text{круга}} < S_{BC} + \frac{2}{3} (S_{EF} - S_{BC}),$$

что можно переписать в виде:

$$S'_{\text{круга}} < \frac{2}{3} S_{EF} + \frac{1}{3} S_{BC}.$$

После этого идут теоремы, касающиеся длины окружности.

7°. *Длина окружности больше периметра вписанного правильного многоугольника вместе с третьей разности этого периметра с периметром вписанного многоугольника с вдвое меньшим числом сторон.*



Фиг. 8

Пусть в круг (фиг. 8) вписан многоугольник ACD , площадь и периметр которого мы обозначим через S_n и p_n , затем многоугольник с вдвое большим числом сторон $AECBDF$, для которого соответствующие величины будут S_{2n} и p_{2n} , и, наконец, многоугольник $ALEMС...$ с еще вдвое большим числом сторон,

площадь и периметр которого будут S_{4n} и p_{4n} ; пусть, наконец, $OE=R$ будет радиус круга. Согласно предложению 5° мы имеем:

$$S_{\text{круга}} > S_{4n} + \frac{1}{3}(S_{4n} - S_{2n}). \quad (1)$$

Для получения соотношения между периметрами круга и правильных многоугольников нам остается ввести в выражения для площадей радиус круга R .

Площадь S составляется из суммы площадей треугольников типа OAE . Мы имеем:

$$\triangle OAE = \frac{1}{2} AE \cdot OH = \frac{1}{2} AE \cdot OE \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} OE \cdot AK.$$

Суммируя все такие треугольники, мы придем к равенству

$$S_{2n} = \frac{1}{2} R p_n.$$

Аналогично можем написать

$$S_{4n} = \frac{1}{2} R p_{2n}.$$

Заменяя в (1) площадь круга выражением $\frac{1}{2} R \cdot 2\pi R$, получаем:

$$\frac{1}{2} R \cdot 2\pi R > \frac{1}{2} R p_{2n} + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2} R p_{2n} - \frac{1}{2} R p_n \right).$$

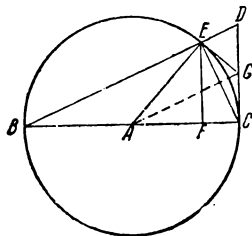
Производя очевидные сокращения, находим:

$$2\pi R > p_{2n} + \frac{1}{3}(p_{2n} - p_n) = \frac{4}{3} p_{2n} - \frac{1}{3} p_n.$$

Таким образом, если из 16 сторон вписанного 12-угольника вычтем две стороны вписанного шестиугольника, то полученный остаток будет меньше окружности. Мы получили нижний предел для вычисления длины окружности.

Для определения верхнего предела Гюйгенс доказывает предварительно следующую лемму (фиг. 9):

8°. Если в конце C диаметра проведем касательную CD к окружности, а из противоположного конца B какую-нибудь пересекающую ее секущую BED , то две трети отрезка CD касательной, сложенные с одной



Фиг. 9

третью перпендикуляра EF , опущенного из точки E пересечения секущей с окружностью, будут больше дуги EC круга, заключенной между секущей и диаметром.

Выполнив указанное построение, проведем в точке E касательную EG к окружности. Тогда $EG = GC$. Так как угол BEC прямой, то углы DEG и EDG будут равны как дополнения до 90° равных углов CEG и GCE . Следовательно,

$$EG = CG \doteq DG.$$

На основании рассуждений, аналогичных тем, которые имели место при доказательстве предложения 6^о, можем написать:

$$\text{Сектор } AEC < \frac{2}{3} \text{ Площ. } AEGC + \frac{1}{3} \triangle AEC.$$

Но площадь сектора AEC равна половине произведения радиуса AC на длину дуги EC , площадь $AEGC$ равна удвоенной площади $\triangle AGC$, т. е. $AC \cdot GC$, или $\frac{1}{2} AC \cdot CD$, и, наконец, площадь $\triangle AEC$ равна $\frac{1}{2} AC \cdot EF$. Подставляя эти величины в вышенаписанное неравенство, получим после очевидных сокращений:

$$\text{Дуга } EC < \frac{2}{3} CD + \frac{1}{3} EF.$$

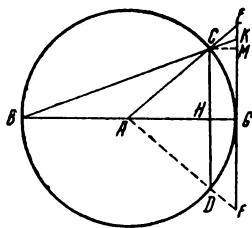
9^о. Окружность меньше двух третей периметра вписанного многоугольника вместе с третью периметра описанного многоугольника с таким же числом сторон.

Пусть EF и CD будут сторонами описанного и вписанного многоугольников (фиг. 10). Выполнив построение предыдущего предложения, можем написать:

$$\text{Дуга } CG < \frac{2}{3} KG + \frac{1}{3} CH. \quad (1)$$

Из точки C опустим перпендикуляр CM на EG . Так как угол A вдвое больше угла B , то прямая CK будет биссектрисой угла ECM . Тогда, поскольку $CM < CE$, по свойствам биссектрисы будем иметь:

$$EK > KM.$$



Фиг. 10

Это неравенство можно переписать так:

$$EG - KG > KG - MG = KG - CH,$$

откуда $EG + CH > 2KG,$

или $EG + 2CH > 2KG + CH.$

Разделив обе части этого неравенства на 3, можем переписать неравенство (1) так:

$$\text{Дуга } CG < \frac{2}{3}KG + \frac{1}{3}CH < \frac{1}{3}EG + \frac{2}{3}CH.$$

Если мы суммируем такие неравенства для всех половинок CH и EG сторон вписанного и описанного многоугольников, то получится:

$$2\pi R < \frac{1}{3}p_{\text{опис.}} + \frac{2}{3}p_{\text{впис.}}, \quad (2)$$

где R — радиус круга, а $p_{\text{опис.}}$ и $p_{\text{впис.}}$ — периметры рассматриваемых многоугольников.

После этого Гюйгенс переходит к вычислению π . Пусть радиус круга равен 10 000. Тогда сторона a_{12} вписанного двенадцатиугольника будет заключаться между пределами:

$$5\,176\frac{3}{8} < a_{12} < 5\,176\frac{2}{3}.$$

Если через p_{12} и p_6 обозначим периметры вписанных двенадцатиугольника и шестиугольника, то нижний предел для π мы получим согласно предложению 7°:

$$2\pi \cdot 10\,000 > p_{12} + \frac{1}{3}(p_{12} - p_6) = 62\,822,$$

откуда: $\pi > 3,1411.$

Для вычисления верхнего предела мы должны знать сторону b_{12} описанного 12-угольника. Мы имеем:

$$b_{12} < 5\,359.$$

Если P_{12} будет периметр описанного 12-угольника, то формула (2) предложения 9° дает:

$$2\pi \cdot 10\,000 < \frac{2}{3}p_{12} + \frac{1}{3}P_{12} = 62\,847\frac{1}{5},$$

откуда $\pi < 3,14236.$

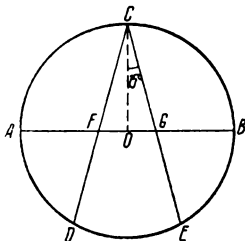
Из рассмотрения 60-угольников Гюйгенс получил для π значение:

$$\pi = 3,14159265$$

с восемью верными десятичными знаками.

В заключение Гюйгенс дает изящное построение для определения длины окружности.

Пусть дана окружность с диаметром AB (фиг. 11). Делим полуокружность ACB пополам в точке C , а полуокружность $ADEB$ на три равные части в D и E . Проводим соединительные прямые CD и CE , которые пересекут диаметр AB в точках F и G . Тогда сторона CF , сложенная с основанием FG , будет равна длине четверти окружности AC , причем ошибка не превышает $\frac{1}{4000}$ диаметра.



Фиг. 11

Доказательство мы можем предоставить нашим читателям, заметив только, что FG равна стороне описанного 12-угольника, а сторона CF будет равна удвоенной стороне вписанного 12-угольника:

$$CF = \frac{OC}{\cos 15^\circ} = \frac{2 OC \cdot \sin 30^\circ}{\cos 15^\circ} = 4 OC \sin 15^\circ.$$

V

Когда в 1652 году Гюйгенс перестал работать над книгой «О равновесии тел, плавающих в жидкости», то его внимание привлек предмет, бывший далеким от занятий Архимеда, но зато разрабатывавшийся чуть ли не заново самим Декартом. Это была диоптрика — учение о преломлении света. Знакомому своему, Андрэ Такэ, тоже работавшему над теорией равновесия плавающих тел, он пишет 29 октября 1652 года:

«Ты знаешь, что эту же самую тему я уже рассматривал ранее. Теперь же я весь поглощен диоптрикой и недавно сделал изящное изобретение, при помощи которого мне, как я полагаю, можно будет гораздо лучше других конструировать телескопы... Это изобретение заключается в том, что я доказал возможность при помощи сферической поверхности сходящиеся в одной точке лучи заставить сходиться в

другой точке, расположенной ближе или дальше, и при этом совершенно точно».

Немного позже 10 декабря 1652 года он пишет ему же:

«Я уже имею почти написанные две книги об этом предмете, к которым прибавляется и третья: первая говорит о преломлении в плоских и сферических поверхностях..., вторая о видимом увеличении или уменьшении изображений предметов, получающихся при помощи преломления».

Третья книга, в которой предполагалось говорить о телескопах и микроскопах, была написана чуть позже.

Впрочем, нужно сказать, что «Диоптрику» Гюйгенса постигла печальная судьба. Гюйгенс работал в этой области очень долго, добился важных результатов, несколько раз уже был готов опубликовать ее, но вышла она из печати только после его смерти в «Посмертных произведениях», появившихся в 1703 году. Вследствие этого довольно трудно определить время появления отдельных результатов, полученных Гюйгенсом, и лучше всего рассмотреть его «Диоптрику» как единое целое.

Зрительные трубы стали появляться с самого начала XVII в. В качестве первых конструкторов Гюйгенс упоминает о голландцах Иоганне Липперсгейме и Захарии Янсене, построивших около 1609 года первый телескоп длиной не более полутора футов. После них работал в Алькмаре (Голландия) Якоб Меций. Независимо от них в 1609 году построил зрительную трубу Галилей.

Что касается теоретических основ конструкции зрительных труб, то в этом отношении дело обстояло значительно хуже. Само явление преломления было известно уже в древности. В «Оптике» Птолемея (автора «Альмагеста») приводятся опыты, дающие в случае стекла значения углов преломления для различных углов падения. «Оптика» Птолемея Гюйгенсу была неизвестна, но данные этих опытов имелись в книге польского писателя XIII в. Вителло, труды которого Гюйгенс изучал. Значение этого автора видно из того, что сочинение Кеплера по оптике носило название «*Paralipomena ad Vitellionem*» (Добавления к Вителлиону¹). В этой книге Кеплер пытался дать закон преломления, но истинного закона

¹ В и т е л л и о н — латинизированная форма имени Вителло.

не нашел. Он был найден голландцем Виллибродом Снеллием и независимо от него Декартом, который и опубликовал его в своей «Диоптрике» в 1629 году. В своей «Диоптрике» Гюйгенс является продолжателем Декарта, основные положения которого (закон синусов) он полностью принимал, но в разработке темы он пошел гораздо дальше Декарта.

Работа Гюйгенса начинается кратким историческим обзором, после которого даются различные способы определения коэффициента преломления. Он находит коэффициент преломления, если известны радиусы кривизны цилиндрического или плоско-выпуклого стекла, а также расстояние до получаемого при их помощи изображения. Интересен еще один способ, в котором чувствуется определенное влияние Декарта. Последний, зная коэффициент преломления водяных капель, вычислял размеры получающейся радуги. Гюйгенс же, наоборот, измеряя величину радуги от небольшой сферы испытуемого вещества, определял коэффициент его преломления.

После этого Гюйгенс занимается определением фокусов чечевицы и изображений предметов. Он рассматривает сначала ход лучей в двух средах с различными коэффициентами преломления, границей между которыми является сферическая поверхность. После этого выводится основная формула для линзы; Гюйгенс выражает ее следующим образом:

«Предложение 13. Дана какая-нибудь линза выпуклая или вогнутая, образуемая или двумя сферическими поверхностями, или же сферической и плоской; на ее оси дана точка, из которой выходят, или в которой сходятся падающие на линзу лучи; строим третью пропорциональную для двух начинающихся в этой точке прямых, одна из которых представляет расстояние до точки пересечения преломленных лучей, идущих параллельно оси с противоположной стороны, а вторая — расстояние до самой чечевицы; тогда конечная точка третьей построенной прямой, откладываемой от данной точки в ту же сторону, что и первые, будет точкой схода или расхождения лучей, выходящих из заданной точки или сходящихся в ней».

Первая точка (фиг. 12) представляет предмет D , P — его изображение (третья точка), C будет чечевицей,

а O — главный фокус. Тогда предложение Гюйгенса, выраженное в математической форме, даст нам:

$$DO \cdot DP = DC^2.$$

Если взять $DO = DC + CO$ и $DP = DC + CP$ (порядок букв дает направление соответствующих отрезков), то наша формула принимает вид:

$$(DC + CO)(DC + CP) = DC^2,$$

или

$$CO \cdot DC + CO \cdot CP + DC \cdot CP = 0.$$

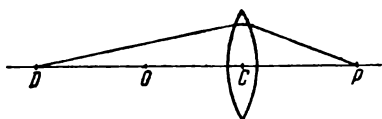
Разделив на произведение $DC \cdot CP \cdot CO$, получим:

$$\frac{1}{CP} + \frac{1}{DC} = \frac{1}{OC},$$

что равносильно известной формуле для связи между расстоянием p предмета, p_1 — его изображения и главным фокусным расстоянием f :

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p_1} = \frac{1}{f}.$$

Если бы Гюйгенс обнародовал свою книгу в 1653 году, то он имел бы определенный приоритет в ряде предложений оптики. К сожалению, когда он в 1669 году послал



Фиг. 12

в Английское Королевское Общество ряд своих открытий, выраженных при помощи анаграмм, то почти все его результаты уже находились в печатывшихся тогда «Лекциях по оптике» (1669) Исаака

Барроу, учителя знаменитого Ньютона, правда, другим способом и притом в несколько более понятном изложении.

Книга Гюйгенса заканчивалась изложением строения глаза и теории зрения, т. е. тем, с чего начиналась «Диоптрика» Декарта.

Вторая книга «Диоптрики» Гюйгенса была посвящена определению увеличения или уменьшения рассматриваемых через линзы предметов. Первые попытки в этом направлении были сделаны еще Кеплером в 1611 году, но его результаты страдали еще от не совершенно точной формулировки.

Из содержащихся в этой книге предложений особенное значение имеет предложение 6:

«Если данный предмет наблюдается через какое угодно число линз и меняются своими местами глаз и наблюдаемый предмет, причем линзы остаются в тех же положениях, то видимая величина рассматриваемого предмета, а также и положение его, останутся теми же, что и раньше».

Когда это предложение было напечатано в 1703 году, то оно осталось совершенно незамеченным. Вся его важность была оценена лишь в самом конце XIX в., когда создавалась теория оптических систем.

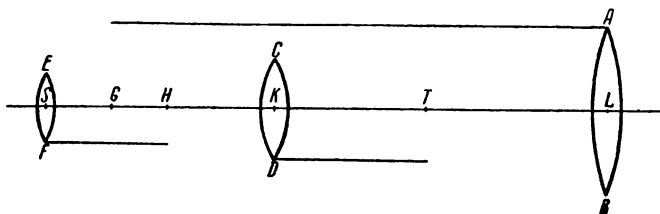
Что касается третьей книги «Диоптрики» Гюйгенса, которую Гюйгенс по первоначальному плану предполагал посвятить теории телескопов, то в 1653 году Гюйгенс полностью закончить ее не мог: в то время еще не знали как следует ни сферической, ни хроматической аберрации и совершенно была неизвестна дифракция света. Работы Гюйгенса в этой области оптики начались в последних числах октября 1652 года, тогда он нашел сферические чечевицы, не дающие сферической аберрации для пучка лучей, выходящих из одной точки. После этого начинается оживленная переписка с шлифовальщиками стекол. Гюйгенс вместе со своим братом Константином работают над изготовлением микроскопов и телескопов, и в феврале 1655 года Константин Гюйгенс-отец уже мог дать восторженное описание микроскопов и телескопов, построенных его сыновьями. Гюйгенсу при помощи телескопа, построенного им самим, удалось сделать выдающееся астрономическое открытие. Он вслед за Галилеем, открывшим четырех спутников Юпитера, обнаружил спутника у Сатурна — Титана.

Продолжая свои оптические работы, Гюйгенс нашел в 1662 году окуляр, получивший его имя. Вот как он описывает его в третьей книге своей «Диоптрики».

«Предложение 3. Показать, каким образом можно улучшить описанные выше телескопы, взявши вместо двух три выпуклые линзы, как мы применяем для ночных наблюдений звезд.

...Действительно, пусть AB будет большая внешняя чечевица (объектив.— $I. B.$), фокусное расстояние которой LG . Это расстояние может равняться

только 2 или 3 футам, или же 6, или 10, или даже 20; мы для всех этих расстояний безразлично можем пользоваться одними и теми же окулярами. Последние состоят из двух чечевиц EF и CD , причем фокусное расстояние KT задней чечевицы будет в 4·раза или чуть меньше превышать фокусное расстояние SH другой чечевицы. Последнее расстояние не должно превышать двух дюймов, ширина чечевицы CD дол-



Фиг. 13

жна равняться $3\frac{1}{2}$ дюймам, а ширина EF в два раза меньше. Расстояние SK между обеими чечевицами должно быть приблизительно вдвое больше SH . Они так соединяются с внешней чечевицей AB , чтобы фокус G последней попал бы между чечевицей EF и ее фокусом H и расстояния GT , GK и GH составляли непрерывную пропорцию» (фиг. 13).

С 1665 года Гюйгенс занялся теорией сферической aberrации. Систематическая работа, давшая важные результаты, была прервана вследствие переезда Гюйгенса во Францию, где он был избран членом Парижской Академии наук. В это время была сделана рукописная копия «Диоптрики», содержавшая только 1-ю и 2-ю книги.

С 1668 года работа начинается снова. Идет проверка теории сферической aberrации, причем сразу же Гюйгенса постигает разочарование — мешает хроматическая aberrация. В период 1672—1673 годов сомнения Гюйгенса заканчиваются. Он знакомится с гипотезой Ньютона о составе белого света. После этого он выбрасывает ряд материалов, касающихся сферической aberrации, и считает, что разрешение задачи может быть получено лишь опытным путем.

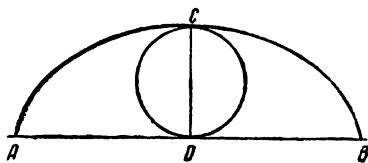
В это время у Гюйгенса зарождается идея о волновой теории света, о которой мы еще будем говорить далее.

С 1684 года он снова возвращается к теории оптических инструментов и заканчивает третью книгу своей «Диоптрики» о телескопах и микроскопах. Работа продолжается до 1692 года, причем Гюйгенс предполагает печатать «Диоптрику» как вторую часть своего «Трактата о свете», посвященного волновой теории света. Выходит она в свет только в 1703 году в «Посмертных сочинениях» Гюйгенса.

Следуя Декарту, Гюйгенс хотел включить в свою «Диоптрику» трактат о радуге, но он так и остался ненапечатанным вплоть до национального издания полного собрания сочинений Гюйгенса.

VI

Работы обоих братьев, Константина и Христиана Гюйгенсов, в области конструирования оптических инструментов увенчались большим успехом. При помощи своих телескопов, бывших в то время лучшими в Европе, Гюйгенсу удалось 25 марта 1655 года открыть, как уже упоминалось, самый большой спутник Сатурна — Титан. Это открытие, а также последовавшее за ним правильное объяснение странного вида Сатурна, который смущал многих астрономов, начиная с Галилея (Гюйгенс первый установил, что тело планеты окружено кольцом), очень хорошо зарекомендовали Гюйгенса среди французских ученых. С несколькими учеными Франции, а именно: механиком Робервалем, астрономом Буйо и литературным критиком Шапленом, у него завязывается оживленная переписка. Французы прислали ему вызов Паскаля, касающийся исследования геометрии циклоиды (так называется кривая (фиг. 14), описываемая точкой, находящейся на окружности круга, катящегося без скольжения по прямой линии). Работе над решением задач Паскаля Гюйгенс посвятил вторую половину 1658 года. Хотя всех задач Паскаля Гюйгенс решить в поставленный срок не смог (этого не смог сделать ни один из современных ему европейских математиков), но Паскаль с большой по-



Фиг. 14

установил, что тело планеты окружено кольцом), очень хорошо зарекомендовали Гюйгенса среди французских ученых. С несколькими учеными Франции, а именно: механиком Робервалем, астрономом Буйо и литературным критиком Шапленом, у него завязывается оживленная переписка. Французы прислали ему вызов Паскаля, касающийся исследования геометрии циклоиды (так называется кривая (фиг. 14), описываемая точкой, находящейся на окружности круга, катящегося без скольжения по прямой линии). Работе над решением задач Паскаля Гюйгенс посвятил вторую половину 1658 года. Хотя всех задач Паскаля Гюйгенс решить в поставленный срок не смог (этого не смог сделать ни один из современных ему европейских математиков), но Паскаль с большой по-

хвалой отозвался о полученных Гюйгенсом результатах. Позднее эти исследования очень помогли Гюйгенсу во время работы над теорией колебаний математического маятника. Между прочим, Гюйгенс показал, что в колебании тяжелой материальной точки, описывающей обращенную выпуклостью вниз циклоиду с вертикальной осью, время полного колебания назад и вперед не будет зависеть от той высоты, с какой скатывается тяжелая материальная точка. Для обыкновенного математического маятника, в котором колебания тяжелой точки происходят по дуге окружности, время полного колебания остается одинаковым лишь при небольших отклонениях от положения равновесия.

В пятидесятых годах XVII в. тридцатилетний Гюйгенс выступает уже вполне сложившимся ученым. Он уже в состоянии отнестись критически к воззрениям Декарта в области механики, в частности к Декартовой теории удара твердых тел.

Основные законы движения были сформулированы Декартом в таком виде («Основания философии», II, § 37, 39, 40):

«Первый закон природы: всякое тело остается в том состоянии, в котором оно находится, пока какие-нибудь другие причины его не изменяют.

Второй закон, который я замечаю в природе, состоит в том, что, в частности, каждая материальная частица, продолжая свое движение, никогда не стремится двигаться по кривым линиям, но только по прямой..., всякое тело движущееся по кругу все время стремится удалиться от описываемой им окружности. И мы можем даже чувствовать это рукой...»

Мы видим, что эти два закона по существу равносильны первой аксиоме Ньютона, или закону инерции. Таким образом, Декарту принадлежит честь первой формулировки этого закона.

В этой связи необходимо исправить встречающееся во многих книгах утверждение, что закон инерции был впервые высказан Галилеем.

Чтобы понять существо вопроса, нужно уяснить полностью тот переворот в механике, который повлекла за собой теория Коперника.

Аристотель и его последователи различали два вида

движений — естественные и насильственные. Первыми они называли те движения, которые совершаются сами собой без вмешательства каких-либо посторонних причин: таковы падение тяжелых тел вниз, подъем легких (огня) вверх и круговые движения небесных тел. Эти движения мы в настоящее время назвали бы инерциальными, происходящими без действия сил, по инерции. Ко второму виду относились движения, которые для своего совершения требовали вмешательства какой-нибудь посторонней причины — силы; например, поднятие тяжелого тела или сбивание огня вниз. Так как естественным движением тяжелых тел, в первую очередь частиц Земли, считалось прямолинейное движение к центру Земли, то теория Коперника сразу же ставила вопрос: к какому роду движений надо отнести требуемое ею вращение Земли (прежде всего суточное вокруг собственной оси). Считать его насильственным не было никакого основания — не заставляя же ангелов вращать Землю, как думали в раннее средневековье относительно суточного вращения неба. Если же признать его естественным, то возникал вопрос, почему же вся Земля в целом имеет естественное движение круговое, а ее частицы — прямолинейное.

Коперник для выхода из этого затруднения предложил принцип, который современные историки науки называют принципом космической инерции. Согласно этому принципу все тела, не находящиеся в своем естественном месте (например, поднятый над землей камень), стремятся достигнуть его, двигаясь прямолинейно, по достижении же естественного места они, стремясь сохранить его, будут совершать равномерное круговое движение, как и все небесные тела. Внимательное чтение «Диалогов о двух системах мира», за которые Галилей подвергся суду инквизиции, показывает, что в нем Галилей целиком придерживался принципа космической инерции Коперника, считая инерциальным равномерное движение тел по окружности большого круга Земли. В другом своем произведении «Беседы о двух новых науках», исследуя параболическое движение выброшенного из пушки ядра, Галилей пользуется при выводе положением, что на Земле всякое тело, движущееся без действия сил по горизонтальной поверхности, будет все время двигаться прямолинейно и равномерно. Это обстоятельство

позволило Маху в его работе «Механика в ее развитии» приписать открытие закона инерции Галилею. Однако, если дать себе труд дочитать следующие за этим местом комментарии персонажей «Бесед» Сагрето и Сальвиати, то становится понятным, что Галилей рассматривал высказанное им положение лишь как первое приближение, аналогичное тому, что на не слишком большом участке земной поверхности можно считать параллельными вертикали, которые в действительности пересекаются в центре Земли¹.

Третий закон движения был высказан Декартом в такой форме:

«Если одно тело встречает другое и если для того, чтобы продолжать движение, оно имеет менее силы, чем встречаемое им для того, чтобы сопротивляться, то оно изменяет направление, не теряя ничего из своего движения, а если имеет больше силы, то увлекает с собою встречаемое тело, причем теряет из своего движения столько, сколько передает его встречаемому телу».

Это так называемый закон сохранения количества движения. В настоящее время количеством движения мы называем векторную величину, имеющую направление скорости и измеряемую произведением массы тела на скорость. Как это видно из формулировки Декарта, у него количество движения направлением еще не обладает.

Для теории удара Декарт установил семь правил, которые были даны им без всяких доказательств и даже объяснений. Он считал их идеальными законами, данными чистым разумом, и не очень заботился о том, согласуются ли они с опытом. Так, например, шестое правило Декарта гласило:

«Если бы тело C находилось в покое и было по величине совершенно одинаково с движущимся по направлению к нему телом B , то необходимо следовало бы, чтобы оно отчасти было оттолкнуто телом B и отчасти заставило бы отскочить последнее».

Об этих правилах Гюйгенс в ненапечатанном предисловии к своей «Теории удара» пишет следующее:

¹ См. Г. Г а л и л е й, Беседы о двух новых науках, ГТТИ, 1934, стр. 418, 427 и следующие.

«Этим правилам Декарта многие поверили, но не могу сказать, то ли вследствие их правоподобности, или же находясь под влиянием остроумнейшего этого философа. Что касается меня, то сомневаться в них меня прежде всего побудило уж слишком большое их расхождение с опытом, ибо я очень часто замечал, что при толчке неподвижного шара другим, одинаковым с ним, последний останавливался и передавал перво-му все свое движение (противоречие с правилом 6.— *И. В.*); кроме того, я замечал при ударе и другие явления очень сильно расходящиеся с приведенными правилами. Наконец, я заметил, что и сами эти законы противоречат друг другу... Действительно, правило 5-ое учит, что если большее тело B ударяет покоящееся меньшее C , то оно теряет кое-что из своей скорости. А по второму закону, если B сталкивается с тем же самым меньшим телом C , идущим навстречу с такой же скоростью, то B ничего не потеряет из своей скорости. Оба эти правила будут совместны только в том случае, если мы скажем, что движущееся тело встречает большее сопротивление от неподвижного, а не от налетающего на него с противоположной стороны, что, конечно, нелепо.

Поэтому ничуть не доверяя этим правилам, я начал помышлять о других, испытав правила всякого рода. Итак, начавши рассматривать их тщательно, я наконец нашел, как полагаю, более истинные и даже совсем верные, которые не менее точно подтверждаются и опытом, и любой механической теоремой».

Для того чтобы читатель мог составить себе полное представление о теории Гюйгенса, рассмотрим явления удара в том виде, как их изображает современная механика.

Предположим, что на горизонтальную плоскость падает без начальной скорости какое-нибудь тело, положим резиновый, стальной или глиняный шарик. При этом могут представиться такие случаи.

1°. Глиняный шарик, упав на плоскость, останется на ней лежать, иными словами, он полностью потеряет свою скорость относительно плоскости. Такой удар мы называем *абсолютно неупругим*.

2°. Очень упругий стальной шарик, отскочив, подыметя на ту же высоту, с которой он начал падать, иными словами, после удара он будет иметь по величине такую же скорость, как и в момент удара, но только с измененным направлением. Такой удар мы назовем *абсолютно упругим*. Как будет видно из дальнейшего, Гюйгенс рассматривает именно этот случай удара.

3°. Большой частью случается, что шарик, подскочив, подыметя на высоту несколько меньшую той, с которой он начал падать. Это значит, что после удара его скорость, направленная вверх, будет несколько меньше той, с которой он ударился о плоскость. Отношение абсолютной величины скорости после удара к абсолютной величине скорости до удара мы называем *коэффициентом восстановления*. Коэффициент восстановления показывает, какую часть своей скорости шарик сохраняет при ударе. Если скорость до удара будет v , а после удара u , то коэффициент восстановления k будет равен:

$$k = \left| \frac{u}{v} \right|,$$

или, если мы будем считать, что скорости, направленные в противоположные стороны, имеют и противоположные знаки:

$$k = - \frac{u}{v}.$$

Такого рода удар называют *неупругим* с заданной величиной коэффициента восстановления.

Нетрудно видеть, что для абсолютно неупругого удара коэффициент $k=0$, а для абсолютно упругого $k=1$.

Мы будем теперь рассматривать тот же самый случай, что и Декарт, а именно: удар двух шаров (фиг. 15) с массами m_1 и m_2 , движущихся по прямой в одну сторону (например, вправо) со скоростями v_1 и v_2 ($v_1 > v_2$). Скорость v_1 мы можем всегда считать положительной; скорость v_2 будем брать со знаком $+$, если она имеет с v_1 одинаковое направление, и со знаком $-$, если m_2 движется навстречу m_1 .

Заметим, что мы всегда один из шаров (например, m_2) можем рассматривать как неподвижный. Для этого достаточно будет сообщить обоим телам одинаковые движения (влево) со скоростью v_2 . Тогда шар m_2 остановит-

ся, а m_1 будет продолжать движение со скоростью $v_1 - v_2$. Поступить таким образом нам позволяет принцип Коперника, утверждающий, что *относительное движение двух тел не изменится, если мы сообщим обоим телам одинаковые движения*. Теперь, поскольку один из шаров можно считать покоящимся, мы имеем право применить к рассматриваемому случаю все те определения, которые были нами установлены выше, для случая удара о неподвижное тело.

Поставим перед собой такую задачу:

Зная массы m_1 и m_2 и скорости v_1 и v_2 соударяющихся шаров до удара, определить их скорости u_1 и u_2 после удара, предполагая, что удар является:

1° абсолютно неупругим,

2° абсолютно упругим,

3° происходящим с коэффициентом восстановления k . При этом будем считать, что точка соударения обоих шаров лежит на одной прямой, соединяющей их центры.

Для всех этих случаев прежде всего имеет место закон сохранения количества движения. Единственная разница с формулировкой Декарта будет заключаться в том, что количества движения будут иметь у нас направления, характеризующиеся знаком «плюс» или «минус». Таким образом:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (1)$$

сумма количеств движения обоих шаров до удара будет равна их сумме после удара.

Что касается второго уравнения, то оно будет разным для всех рассматриваемых случаев.

Проще всего оно получается, если удар будет абсолютно неупругим. Так как относительная скорость взаимно ударяющихся тел в этом случае уничтожается, то мы будем иметь:

$$u_1 = u_2. \quad (2)$$

Если обозначить общую скорость обоих тел через u , то мы будем иметь:

$$u = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

Если удар будет абсолютно упругим, то, кроме количества движения обоих шаров, должна еще сохраняться их кинетическая энергия («живая сила»):

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}. \quad (2')$$

Для нахождения u_1 и u_2 перепишем уравнения (1) и (2') в таком виде:

$$m_1(v_1 - u_1) = m_2(u_2 - v_2)$$

$$m_1(v_1^2 - u_1^2) = m_2(u_2^2 - v_2^2).$$

Разделив почленно нижнее уравнение на верхнее, будем иметь:

$$v_1 + u_1 = u_2 + v_2, \quad (3)$$

или

$$v_1 - v_2 = u_2 - u_1.$$

Заметим, что $v_1 - v_2$ представляет скорость приближения первого шара ко второму (относительную скорость первого шара) до удара, а $u_1 - u_2$ — его относительную скорость после удара. Если переменить знак у этой разности, то мы получим скорость, с которой первый шар будет после удара удаляться от второго. Таким образом, в случае абсолютно упругого удара скорость приближения шаров будет равняться скорости удаления их.

Полученная система уравнений:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2$$

$$v_1 + u_1 = u_2 + v_2$$

позволяет нам по заданным v_1 и v_2 найти u_1 и u_2 .

В самом общем случае, когда удар происходит с коэффициентом восстановления, мы должны написать, что относительная скорость обоих шаров после удара уменьшается, иными словами, множится на коэффициент восстановления и, кроме того, меняет свое направление (знак):

$$u_1 - u_2 = -k(v_1 - v_2). \quad (2'')$$

Уравнения (1) и (2'') решают задачу в самом общем случае. Если $k=0$ (удар абсолютно неупругий), то уравнение (2'') переходит в (2). При абсолютно упругом ударе $k=1$, и мы приходим к уравнению (3), полученному в результате преобразования (2).

Нетрудно видеть, что уравнение (3) после почленного перемножения его обеих частей с (1) дает нам уравнение (2'), выражающее закон сохранения «живых сил».

Теперь нам остается посмотреть, какие средства для решения этой задачи были в распоряжении Гюйгенса,

ными словами очертить в кратких словах состояние механической науки в его время.

Так как механика понималась в то время главным образом как наука о машинах, то ее основные законы излагались в форме законов равновесия сил в машинах. Первый из этих законов — закон рычага — был известен еще в древности. Его первое научное доказательство дал Архимед. Это доказательство вызывало критику не всегда справедливую. Попытку улучшить доказательство Архимеда сделал и Гюйгенс.

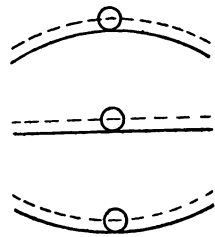
Второй закон касался равновесия сил на наклонной плоскости. Неизвестный грекам он был открыт впервые во Франции в XIII в. в школе Иордана Неморария. Дальнейшее его развитие привело к установлению закона параллелограмма сил, что впервые было сделано Леонардо да Винчи. Гюйгенсу этот закон был известен в формулировке, которую ему дал Симон Стевин (правило силового треугольника). В своих механических исследованиях Гюйгенс применял его к решению отдельных задач. Наиболее известной из них является задача об определении равновесия тяжелой нити. Он занимался этой задачей и в молодости, опровергая утверждения Стевина и Галилея о том, что тяжелая нить имеет форму параболы, и в старости, когда он доказал вместе с Лейбницем и братьями Бернулли, что истинной ее формой является некоторая кривая, так называемая цепная линия. Это последнее стало возможным только после открытия в конце XVII в. математического анализа, создателями которого считаются Лейбниц и Ньютон.

В середине XVII в., когда начались исследования Гюйгенса, основное направление давали работы Архимеда о центре тяжести. Методами Архимеда определялись центры тяжести различных фигур и тел, его применяли также к определению поверхностей и объемов различных тел. Полученные результаты дали обширный материал для построения еще одной части высшей математики, а именно интегрального исчисления. Чисто механические применения теории центра тяжести получила у ученика Галилея, знаменитого изобретателя барометра, Торричелли, который установил принцип определения устойчивости равновесия тяжелых тел.

Этот принцип и до сих пор можно встретить в элементарных учебниках физики, но иногда в неверной форму-

лировке: для того чтобы тяжелое тело находилось в равновесии, необходимо, чтобы центр тяжести и точка опоры находились на одной вертикали; если центр тяжести выше точки опоры, то равновесие будет неустойчивым, если ниже — устойчивым, если совпадает с точкой опоры, то равновесие будет безразличным.

Неправильность такой формулировки можно уяснить, рассматривая равновесие шарика на выпуклой, плоской и вогнутой поверхностях (фиг. 16). Во всех случаях центр тяжести находится выше точки опоры, но в первом случае равновесие будет неустойчивым, во втором — безразличным и в третьем — устойчивым.



Фиг. 16

Правильная формулировка принципа Торричелли будет:

При устойчивом равновесии тела, имеющего точку опоры, центр тяжести тела имеет наименьшую высоту, так что при выходе тела из положения равновесия центр тяжести его будет подниматься. При неустойчивом равновесии, наоборот, центр тяжести тела имеет наибольшую высоту, так что при выходе тела из положения равновесия он будет опускаться. Безразличное равновесие характеризуется тем, что высота центра тяжести сохраняется постоянной при любых перемещениях тела из положения равновесия. Все это вдумчивый читатель легко усмотрит из фигуры 16.

Гюйгенс устанавливает аналогичный принцип и для случая движения тяжелых тел:

«Достовернейшей в механике является аксиома, что в движении тел, происходящем от действия их тяжестей, общий центр тяжести этих тел не может подняться (выше первоначального положения.— *И. В.*)».

Из области динамики в распоряжении Гюйгенса был установленный Декартом закон инерции и исследования Галилея относительно падения тяжелых тел. Если начальную скорость падающего тела мы считаем равной нулю, то для скорости v и пути s падающего тела мы имеем формулы:

$$v = gt$$

$$s = \frac{gt^2}{2},$$

где t — время, а g — ускорение силы тяжести. При падении без начальной скорости пройденный путь s можно рассматривать как высоту h падения, а скорость v как конечную скорость, приобретенную телом при падении с этой высоты. Тогда из написанных выше уравнений можно получить:

$$v^2 = 2gh,$$

или

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Если умножим обе части этого равенства на P — вес падающего тела, то будем иметь

$$Ph = \frac{1}{2} \frac{P}{g} v^2.$$

Если обозначим $\frac{P}{g}$ через m , что, как известно, представляет массу тела, то получим выражение закона кинетической энергии для случая падения тяжелых тел.

Приобретенная телом при падении «живая сила» $\frac{mv^2}{2}$ равна Ph — работе веса P тела на пути h .

Уже самый термин «живая сила», введенный Лейбницем, который называл себя учеником Гюйгенса, показывает, что мы имеем дело с некоторым толкованием *причины* движения, или *силы*. Такого рода представление было у античных механиков эпохи эллинизма, которые считали, что брошенному телу в момент бросания сообщается некоторая сила, необходимая для поддержания движения. Когда эта сила иссякнет, то тело останавливается. В конце средневековья в эпоху развития артиллерии подобное же представление появилось у парижских философов и итальянских механиков, которые называли его *импульсом* (impeto).

Такого же представления о силе держался и Декарт, правда подошедший к нему иначе. В написанном для Константина Гюйгенса «Трактате по механике» он установил правила измерения «силы». Для того, чтобы поднять данный груз на двойную высоту или двойной груз на ту же высоту, требуется двойная «сила». Определение Декарта было воспринято и Христианом Гюйгенсом, который положил его в основу закона сохранения механической энергии. Этот закон за два года до смерти (в

1693 году) был сформулирован Гюйгенсом следующим образом:

«В любых движениях тела ничего не теряется и не пропадает из сил, разве только в определенном действии, для произведения которого требуется такое же количество силы, какое и убыло. Силой же я называю мощь, необходимую для поднятия груза. Таким образом, двойной силой будет та, которая может поднять один и тот же груз на вдвое большую высоту».

Таким образом, Гюйгенса надо поставить в самом начале длинного ряда исследователей, которые принимали участие в установлении всеобщего закона сохранения энергии. Уже из этого можно заключить, что рассматриваемые Гюйгенсом явления удара принадлежат к тому классу, который с нашей точки зрения называется центральным, абсолютно упругим ударом. Это прежде всего устанавливается аксиомой 2.

«В чем бы ни заключалась причина отскакивания твердых тел после взаимного соприкосновения при ударе, мы полагаем, что если два одинаковых тела движутся прямо друг другу навстречу с одинаковыми скоростями, то каждое из них отскакивает с той же скоростью, какую оно имело до удара».

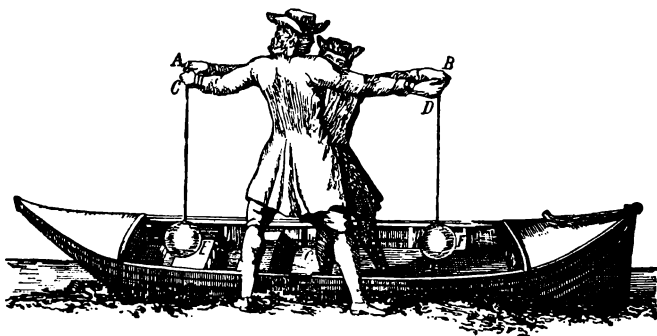
Мы сказали бы, что в этом случае их коэффициент восстановления равнялся бы единице.

Рассматриваемое сочинение «Об ударе тел» представляет с точки зрения современной физики интерес еще и вследствие того, что в нем формулирован принцип относительности в той форме, которая у современных ученых совершенно неправильно называется принципом Галилея. Этот принцип составляет аксиому 3 трактата об ударе, которая у Гюйгенса выражается так:

«Движения тел, а также и их скорости, следует понимать равными или неравными между собой лишь по отношению к другим телам, которые рассматриваются как бы покоящимися, хотя бы эти тела вместе с первыми возможно и участвовали в каком-нибудь другом общем движении. Поэтому если два тела движутся друг другу навстречу, то, хотя бы они одновременно находились, кроме того, в другом равномер-

ном движении, между ними по отношению к телу, движущемуся общим с ними движением, удар произошел бы совершенно так же, как если бы это добавочное общее им всем движение отсутствовало».

Эта аксиома, равнозначная так называемым в современной физике «преобразованиям Галилея», играет важ-

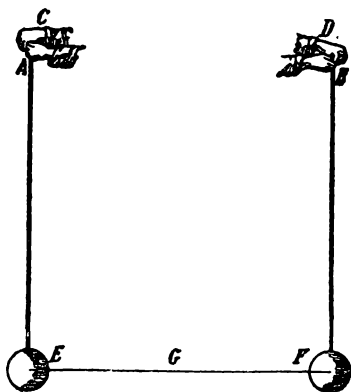


Фиг. 17

ную и активную роль в доказательстве дальнейших предложений. В качестве примера приведем полностью доказательство первого предложения (фиг. 17, 18).

«Предложение 1. Если покоящееся тело ударяет другое одинаковое с ним, то после соприкосновения второе тело остановится, а то, которое ранее покоилось, получит такую же скорость, которая была у ударяющего тела.

Вообразим, что вблизи у берега по течению реки плывет какое-нибудь судно, притом настолько близко к берегу, что стоящий в судне гребец может протянуть руку товарищу, находящемуся на берегу. Пусть гребец держит в своих руках A и B два подвешенных на нитях одинаковых тела E и F , расстояние EF между



Фиг. 18

которыми делится пополам точкой G ; пусть гребец, двигая навстречу друг другу руки равномерным движением, а именно по отношению к себе самому и судну, заставит шарики E и F столкнуться между собой с одинаковыми скоростями; в таком случае они после взаимного соприкосновения необходимо отскочат с одинаковыми скоростями по отношению к этому же гребцу и судну. Пусть одновременно судно будет двигаться влево со скоростью GE , а именно с той же самой, с какой левая рука A перемещается по направлению к правой.

Таким образом, ясно, что рука A гребца относительно берега и стоящего на нем товарища остается неподвижной, тогда как рука B по отношению к тому же товарищу будет двигаться со скоростью FE , вдвое большей, чем GE , или FG . Поэтому, если мы предположим, что стоящий на берегу товарищ своей рукой C схватит руку A гребца и вместе с ней верхний конец нити, поддерживающей шар E , а другой рукой D возьмет руку B гребца, державшего нить, на которой висит F , то ясно, что в то время как гребец заставлял шарики E и F сталкиваться со скоростями одинаковыми по отношению к себе самому и судну, то вместе с этим стоящий на берегу товарищ покоящемуся шару E нанесет удар шаром F , движущимся со скоростью FE относительно берега и самого товарища. И также ясно, что для гребца, движущего как сказано свои шарики, не будет иметь никакого значения, что стоящий на берегу товарищ держит его руки и верхние концы нитей, так как он только сопутствует их движению, не причиняя ему никаких препятствий. На том же основании и для стоящего на берегу товарища,двигающего шарик F по направлению к неподвижному E , тоже не будет никакой помехи от того, что гребец будет держать его руки своими, если только обе руки A и C будут неподвижны по отношению к берегу и товарищу, а руки D и B движутся с одинаковой скоростью FE . Но так как согласно сказанному шарики E и F после взаимного соприкосновения отскочат с одинаковыми скоростями по отношению к гребцу и судну, а именно: шарик E со скоростью GE , а шарик F со скоростью GF , а само судно в то же время движется налево со скоростью GE , или FG , то от-

сюда следует, что по отношению к берегу и товарищу шарик F после удара останется неподвижным, а другой E по отношению к ним же будет двигаться влево с удвоенной скоростью GE , т. е. с такой же скоростью FE , с какой шарик F налетал на E . Таким образом, мы доказали, что для стоящего на земле и ударяющего неподвижное тело одинаковым с ним другим телом последнее после соприкосновения теряет все свое движение, а первое целиком его приобретает. Это и требовалось доказать».

Затем аналогично доказывается, что при ударе двух тел с неодинаковыми скоростями эти тела после соприкосновения будут двигаться, обменявшись взаимно скоростями. После этого устанавливается, что скорость сближения двух шаров до удара будет равняться скорости их взаимного удаления после удара (основное свойство абсолютно упругого удара, аналогичное нашему равенству (3) после соответствующей перестановки членов) и, наконец, в предложении 5 устанавливается обратимость удара.

«Если каждое из двух тел возвратится к встрече с такой же скоростью, с какой оно отскочило после удара, то каждое из этих тел после второго удара приобретает ту же самую скорость, с какой оно двигалось навстречу до первого удара».

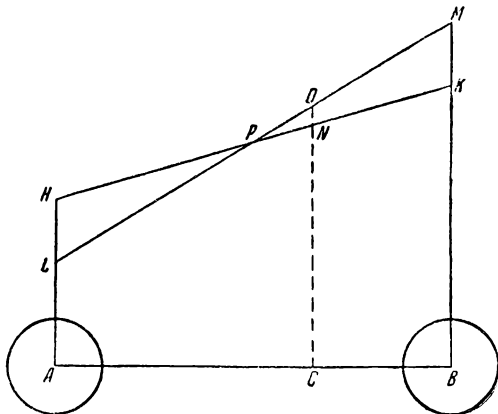
Далее Гюйгенс указывает (это стояло лишь в первоначальном тексте), каким образом надо исправить формулированный Декартом закон сохранения количества движения, а именно, различая как положительные, так и отрицательные количества движения, направленные в противоположные стороны.

В доказательстве предложения 8 играет роль «достовернейшая в механике аксиома», что в движениях под действием силы тяжести общий центр тяжести не может подняться выше первоначального положения.

Восьмое предложение формулируется Гюйгенсом так:

«Если два тела движутся навстречу друг другу со скоростями обратно пропорциональными величинам этих тел, то после удара каждое из них отскочит с той же самой скоростью, какую оно имело до удара».

Идея доказательства состоит в следующем. Пусть два ударяющихся тела будут A и B , причем скорости их AC и BC будут обратно пропорциональны их массам A и B . Предположим, что скорость AC первое тело приобрело, падая с высоты HA . Аналогично, второе тело получило скорость BC , падая с высоты KB (фиг. 19). Гюйгенс представляет, что изменение направления скорости с горизонтального на вертикальное может быть произведено при помощи удара об упругие подставочки,



Фиг. 19

плоскости которых образуют угол в 45° с горизонтом. Таким образом, первоначально центр тяжести обоих тел находился в точке N , которую мы получим проведя прямую NK и разделив ее так, чтобы NN и NK относились бы обратно пропорционально массам ударяющихся тел. Если после удара тело A отскочит назад со скоростью меньшей первоначальной, то вследствие равенства скоростей приближения и удаления тело B должно отскочить со скоростью большей первоначальной. Вследствие этого, если мы опять при помощи упругих подставочек изменим горизонтальные скорости в вертикальные, то первое тело поднялось бы на меньшую высоту AL , а второе на большую BM . Проведем прямую LM и опять разделим ее в точке O обратно пропорционально массам обоих тел. Тогда O будет центром тяжести обоих тел в их окончательном положении. На основании принятой Гюйгенсом

аксиомы точка O не может быть выше N . Следовательно, скорость A после удара не может быть меньше AC .

Если бы точка O оказалась ниже N , то мы по закону обратимости стали бы рассматривать явление удара в обратном порядке, изменив скорости до удара на скорости после удара. Тогда точка N — центр тяжести обоих тел после удара и изменения направления движений обоих тел на вертикальные — оказалась бы выше первоначального положения O , что тоже невозможно. Следовательно, точки O и N должны совпасть. Но тогда совпадут и точки H с L , а M с K , что и доказывает теорему.

Затем Гюйгенс дает способ определения скоростей тел после удара (предложение 9) по существу равнозначный с нашими уравнениями (1) и (3).

Равным образом предложение 11 выражает нашу формулу (2') — закон сохранения «живых сил» при ударе; у Гюйгенса он формулируется так:

«При взаимном ударе двух тел величина, получающаяся после сложения произведений величины каждого тела на квадрат его скорости до удара, будет равной той, которая получится после удара, если, конечно, отношения величин и скоростей обоих тел изобразятся линиями или числами».

До сих пор при переводе формулировки Гюйгенса мы избегали пользоваться словом «масса». Действительно, Гюйгенс, следуя Архимеду, то, что мы теперь называем массой, называл просто «величиной», подразумевая под ней площади и объемы геометрических фигур. Но если 27-летний Гюйгенс еще не имел нашего представления о массе тела, то позднее он к этому понятию пришел: в 1686 году, в ответе на критику Лейбницем закона сохранения количества движения у Декарта, он говорит о «силах двух движущихся тел одного рода, которые пропорциональны произведению их масс на их скорости».

Трактат заканчивается интересной теоремой, которую мы предлагаем любознательным читателям.

«Предложение 12. Если какое-нибудь тело движется по направлению к покоящемуся, которое больше или меньше его, то оно сообщит ему большую скорость, если между ними поместить покоящееся тело промежуточной величины, чем в том случае, когда бы

оно ударило покоящееся тело без всяких находящихся между ними. Наибольшую же скорость оно сообщит ему тогда, когда промежуточное тело будет средним пропорциональным между обоими крайними».

Нам остается теперь сказать несколько слов о дальнейшей судьбе рассматриваемого произведения. Несмотря на то, что основной его текст был закончен уже в 1652 году, Гюйгенс его не печатал вследствие того, что, «кроме этих законов (теории удара.— *И. В.*), существуют еще и некоторые другие законы о природе движения, которые мной еще не усмотрены достаточно глубоко и ясно и требуют более продолжительного размышления». В этой связи не следует забывать, что для Гюйгенса теория удара имела гораздо большее значение, чем для нас в настоящее время. Теперь мы, воспитанные на динамике Ньютона, вполне удовлетворяемся математическим выражением закона действия сил, не ставя вопроса о механизме их действия. Для Гюйгенса выяснение способа действия сил, передачи движения от одного тела к другому было основным. Поскольку Гюйгенс, как истинный последователь Декарта, отрицал действие на расстоянии вроде Ньютонова тяготения, для него действие силы сводилось к непосредственному прикосновению, частным случаем которого и является удар.

Это свойственное Гюйгенсу критическое отношение к своим произведениям привело к тому, что «Теория удара твердых тел» увидела свет только после смерти Гюйгенса. В бытность свою в Англии в 1661 году Гюйгенс демонстрировал опыты, подтверждавшие его теорию удара. Секретарь Лондонского Королевского Общества Ольденбург пишет философу Спинозе (18 декабря 1665 года): «Я не присутствовал, когда господин Гюйгенс делал здесь в Лондоне опыты, подтверждающие его теорию. Все-таки я знаю, что между прочим был подвешен шар весом один фунт в виде маятника; когда он был отпущен, то ударил другой шар, подвешенный точно так же, но только весом в полфунта; угол отклонения был сорок градусов, и Гюйгенс после небольшого алгебраического вычисления предсказал, каков будет результат, который оказался в точности соответствующим предсказанию». В 1668 году Гюйгенс изложил свою теорию удара в Парижской Академии наук. В конце того же года вопрос об

исследовании явлений удара был поставлен и в Лондонском Королевском Обществе, которое обратилось с просьбой о присылке своих теорий к Гюйгенсу, Рену (Wren) и Валлису. Теория Рена, разработанная еще в 1660 году, оказалась в точности совпадающей с Гюйгеновой. Что касается Валлиса, то данная им теория касалась того, что мы теперь называем абсолютно неупругим ударом.

VII

Время, проведенное Гюйгенсом в Гааге с декабря 1655 года (возвращение из Франции) по октябрь 1660 года, было эпохой наибольшего расцвета деятельности Гюйгенса. В это время, кроме завершения теории кольца Сатурна и теории удара, были выполнены почти все основные работы Гюйгенса, доставившие ему наибольшую славу. И те историки науки, которые считают, что ученый формируется примерно до тридцатилетнего возраста, а после этого просто повторяет самого себя, могли бы с известным правом использовать пример Гюйгенса (ему исполнилось тридцать лет в 1659 году). Для суждения относительно этих лет и следующего периода жизни Гюйгенса мы располагаем его черновыми тетрадями, в которых он вел свои предварительные расчеты. Первая из них (Манускрипт А) начинается 7 апреля 1658 года, а последняя (они перенумерованы буквами азбуки от А до I) кончается примерно за три месяца до смерти Гюйгенса.

Если выбирать основную тему деятельности Гюйгенса, то в качестве такой с наибольшим правом можно было бы назвать его работу над проблемой создания часов. Правда, она не является единственной интересовавшей Гюйгенса, но с ней связано наибольшее число отдельных исследований Гюйгенса, и эта тема интересовала его наиболее долгое время — вплоть до самой его смерти.

Та значительная роль, которую она играла в жизни Гюйгенса, объясняется прежде всего тем, что она отвечала насущнейшей потребности всего западного мира, которая появилась в XVI и XVII вв.

С XVI в., после открытия Америки, начинается колониальная эпоха. Претендентами на мировое экономическое господство выступают по очереди страны, лежащие на западном побережье Европы,— в первую очередь

Португалия, за ней Испания, Нидерланды, Франция и, наконец, Англия.

Вторая половина XVII в., к которой относится деятельность Гюйгенса, была как раз временем, когда ведущей страной являлась родина Гюйгенса — Голландия. Голландцы называют XVII в. «золотым веком» своей науки и искусства. Центр тяжести экономической жизни Европы перемещается от Средиземного моря к Атлантическому океану. Но плавание в океане ставило для кораблевождения совершенно другие задачи, чем плавание по Средиземному морю, где ориентировка не представляла трудностей даже для мало опытного морехода и где берега можно было достигнуть, в случае надобности, в какие-нибудь два-три дня плавания. В открытом океане плавание продолжалось неделями и месяцами. Под угрозой смерти от голода и жажды было необходимо с достаточной точностью определять положение корабля в океане, мы сказали бы географические координаты — долготу и широту места нахождения.

Хорошо известно, что для этого необходимы некоторые астрономические сведения. Однако далеко не все знают, как определяется географическое положение судна. Поэтому не будет лишним посвятить несколько строк этому вопросу.

Определение широты места, т. е. градусного расстояния от экватора Земли (широта 0°) или до полюса Земли (широта 90°), не представляло затруднений. На полюсе Земли небесный экватор совпадает с горизонтом, а полюс мира находится в зените, так что проведенная через него до горизонта дуга содержит 90° . На экваторе Земли, наоборот, через зенит проходит небесный экватор, а полюс мира находится на самом горизонте, имея угловую высоту 0° . В промежуточных местах угловая высота полюса мира над горизонтом имеет значение, заключенное между 0° и 90° . Эта высота, измеренная в градусах, и дает величину широты места, которая может быть северной или южной. Конечно, измерение угловой высоты полюса мира может быть произведено только ночью, а на корабле вообще представляет затруднения, но мы могли бы избежать их, если бы вместо угловой высоты полюса мира стали бы измерять равную ей дугу, представляющую угловое расстояние от зенита до небесного экватора. Если бы Солнце двигалось точно по небесному экватору,

то для этого потребовалось бы только ровно в полдень, когда высота Солнца является наибольшей, измерить угловое расстояние от Солнца до зенита, или дополняющее его до 90° угловое расстояние Солнца до горизонта. Правда, Солнце движется не по экватору, а по эклиптике. Но угловое расстояние его до экватора, так называемое склонение Солнца, может быть заранее вычислено для любого дня в году. Поэтому, если капитан не путает чисел месяца и знает склонение Солнца, то угол между экватором и горизонтом получается простым вычитанием из полуденной угловой высоты Солнца его склонения, если оно северное, или прибавлением его абсолютной величины, если оно южное.

Гораздо сложнее обстоит дело с определением долготы, которая отсчитывается по экватору и изменяется в пределах 360° градусов (обычно различают западную и восточную долготы до 180° , причем 180° западной или восточной долготы соответствуют одному и тому же меридиану). Определения долготы основываются на том, что Земля за одни сутки поворачивается на 360° , или за один час на $\frac{360}{24} = 15^\circ$. Так как вращение Земли происходит с запада на восток, то это значит, что в тот момент, когда в Москве бывает полдень, на расстоянии 15° долготы от нее к востоку будет уже 1 час дня, а на расстоянии 15° к западу всего только 11 часов. Таким образом, зная разницу времени между двумя пунктами в один и тот же момент, можно определить соответствующую разность долгот, считая по 15° на 1 час, по $15'$ на одну минуту и т. д. В настоящее время, когда по радио дается московское или гринвичское время (принято все долготы отсчитывать от гринвичского меридиана), определение долготы не представляет никаких затруднений. Мореплавателю достаточно будет установить, какому времени места его наблюдения (проще всего полудню, когда определяется широта) соответствует гринвичское время. В XVII в., когда о радио не было и помину, дело было значительно сложнее. Если бы затмения Луны совершались чаще, чем это имеет место в действительности (а также если бы движение Луны было достаточно хорошо известно), то можно было бы рассматривать момент затмения как сигнал, при помощи которого по заранее вычисленным таблицам можно было бы определить грин-

вичское время. После открытия спутников Юпитера, затмения которых происходят гораздо чаще лунных, Галлей предложил использовать и их для определения долгот, но для этого нужно было хорошо знать движения спутников Юпитера, а также иметь возможность произвести соответствующие наблюдения, а Юпитер виден не каждую ночь.

Таким образом, в эпоху Гюйгенса задача определения долгот представляла значительные трудности и правительства различных стран, в том числе и Голландии, назначали большие денежные премии для человека более или менее удовлетворительно ее решившего.

Впервые Гюйгенсу пришлось столкнуться с этим вопросом в 1655 году, когда Генеральные Штаты Голландии прислали ему на отзыв способ определения долгот, предложенный бранденбургским математиком Иоганном Плацентином. Способ его состоял в том, что требовалось определить время, когда Луна будет иметь наибольшую высоту, и сравнить это наблюденное по своему меридиану время с соответствующими временами, наблюденными на бранденбургской обсерватории во Франкфурте на Одере. Разность этих времен, переведенная на градусы, считая по 15° на час, должна была дать разность соответствующих долгот. Гюйгенсу нетрудно было показать вздорность этого способа. Во-первых, пишет он, между $9^{\text{ч}} 7^{\text{мин}}$ во Франкфурте и $10^{\text{ч}} 2^{\text{мин}}$ там же действительно пройдет $1^{\text{ч}} 14^{\text{мин}}$, но между $9^{\text{ч}} 7^{\text{мин}}$ во Франкфурте и $10^{\text{ч}} 21^{\text{мин}}$ в Лондоне вследствие разности долгот этого уже не будет (сравниваются не один и тот же, а различные моменты времени). «В этом, пишет Гюйгенс, заключается его первая и самая большая ошибка». Вторая же ошибка состоит в том, что за один час Луна проходит не 15° , а меньше вследствие собственного движения ее по небесному своду. Генеральные Штаты прочли, поблагодарили, положили рукопись Гюйгенса в секретную камеру и запросили еще отзыв у Ван-Схоутена, учителя Гюйгенса. На этом дело и заглохло.

В это же время у Гюйгенса назревает другое решение вопроса об определении долготы. Время какого-нибудь основного пункта, выбранного в качестве начала отсчета долгот, можно просто «перевезти», снабдив капитана часами, идущими по этому времени. В таком случае для определения долготы капитану просто придется в

истинный полдень места своего наблюдения поглядеть, сколько показывают часы, идущие по времени пункта начала отсчета долгот. Это в свою очередь потребовало заняться изысканием способов усовершенствования имевшихся в то время часов.

Наиболее употребительным в то время был механизм часов, схожий в основе с нашими ходиками (только без маятника). Механизм часов приводился в движение тяжелой гирей на цепи, намотанной на горизонтальный вал, вращение которого так или иначе при помощи системы зубчатых колес передавалось показывающим время стрелкам. Если бы этот вал был свободен, то под действием гири он стал бы вращаться равноускоренно, пока гиря не опустилась бы на всю длину цепи. Поэтому нужно было периодически останавливать вращение вала, не позволять ему вращаться очень быстро. Это периодическое задерживание вращения главного вала производилось следующим образом. Главный вал сцеплялся при помощи ряда колес с другим тоже горизонтальным валом, на который было насажено так называемое «коронное» колесо. Зубцы этого колеса были перпендикулярны к плоскости основания и расположены с одной стороны этой плоскости. Чтобы представить это, достаточно вообразить средневековую корону, насаженную на горизонтальную ось вращения, перпендикулярную плоскости основания короны. Зубцов должно быть непременно нечетное число для того, чтобы никакой диаметр основания не мог одновременно упираться в два зубца. Кроме того, зубцы не были симметричными: одна сторона их была полой, а другая перпендикулярной к плоскости основания (как у пилы). Рядом с «коронной» со стороны ее зубцов помещалась вертикальная ось, снабженная двумя пластинками (палетками), плоскости которых проходили через ось и составляли бы между собой угол примерно в 90° . Расстояние между палетками равнялось диаметру коронного колеса и они были расположены так, что каждая из них могла входить в промежутки между зубьями коронного колеса, одна наверху, а другая внизу, но только не одновременно обе (для этого плоскости обеих палеток и составляли друг с другом угол в 90°). Кроме того, на упомянутой вертикальной оси был укреплен «биянец» — горизонтальный стержень с тяжелыми массами по краям, вращавшийся вместе с вертикальной осью и

игравший для нее роль маховика. Действие всего этого сооружения было следующее. Пусть в начальный момент одна из палеток, положим верхняя, находилась между зубцами коронного колеса. При вращении вала зубец прямой своей стороной нажимал на палетку и заставлял вращаться вертикальную ось. Через некоторое время нижняя палетка тоже оказывалась между зубцами коронного колеса и вследствие инерции билянца заставляла колесо остановиться и может быть даже несколько отойти назад. Когда импульс билянца угасал, то непрерывно действующая гиря заставляла вал снова вращаться и нижний зубец коронного колеса приводил во вращение палетку и связанный с ее осью билянец, теперь уже в противоположную сторону, пока верхняя палетка опять не попадала между зубцами. Таким образом, при помощи этих попеременных задержек то вверх, то вниз ускоренное вращение главного вала превращалось в среднем в равномерное, так что в одинаковые промежутки времени, когда билянец двигался то в одну, то в другую сторону, главный вал вместе с указывающими время стрелками поворачивался на одинаковые углы. Конечно, можно было подобрать размеры всех частей часов так, чтобы стрелки делали полный оборот за 12 часов, или за сутки, но большой точности таким образом добиться было нельзя.

Молодому Галилею, наблюдавшему, по преданию, качания люстры в Пизанском соборе во время скучной мессы, удалось заметить, что время качания люстры было одинаковым независимо от того, будут ли размахи люстры (так называемые амплитуды ее колебаний) маленькими или большими. Мы знаем теперь, что это верно лишь для небольших колебаний, когда наибольший угол размаха не превышает $5-7^\circ$, но, поскольку пизанская люстра тоже особенно больших колебаний не совершала, Галилею заметить это было невозможно. После этого у астрономов возникла идея воспользоваться одинаковостью времен колебания маятника (как говорят, их изохронизмом) для получения более мелких единиц времени. Считалось число колебаний маятника, который при этом во избежание остановки нужно было осторожно подталкивать. Конечно, эта работа являлась очень скучной и в счете легко можно было ошибиться. Поэтому, естественно, возникла идея, нельзя ли заставить сам

маятник считать свои колебания, иными словами, просто соединить его с часами. У Галилея такая идея действительно родилась, но сам он привести ее в исполнение не мог. То, что не удалось Галилею, привел в исполнение Гюйгенс.

Уже в начале 1657 года он пишет Схоутену (12 января 1657):

«На этих днях я нашел новую конструкцию часов, при помощи которой время измеряется так точно, что появляется немалая надежда на возможность определения при ее помощи долготы, даже если придется везти их по морю».

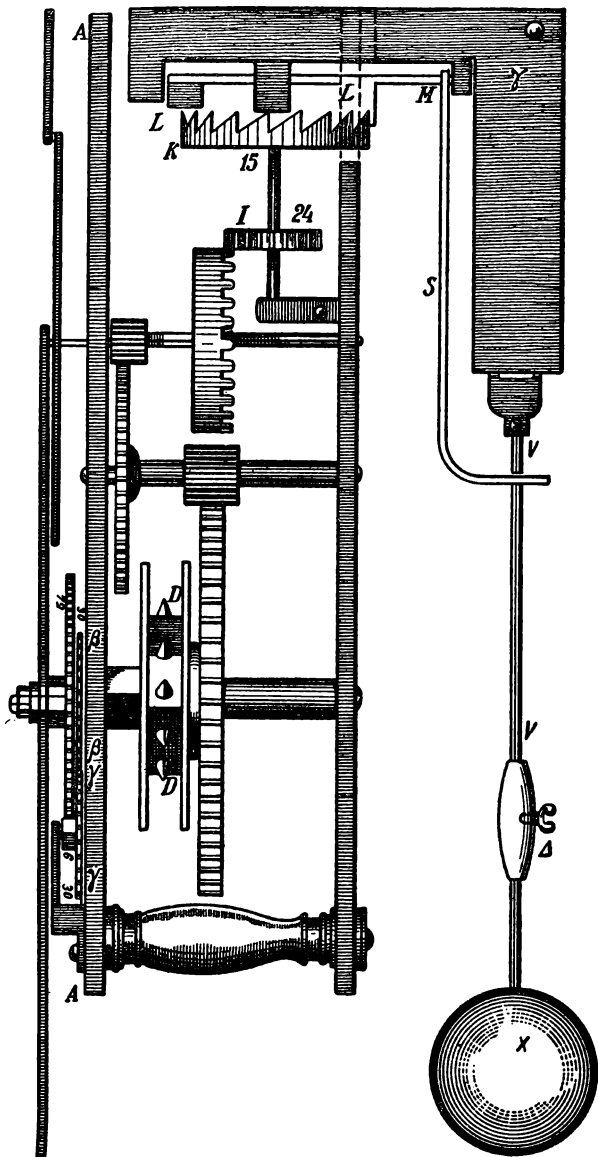
Конечно, последняя задача была полностью осуществлена только уже по смерти Гюйгенса лондонским часовщиком Гаррисоном (первая половина XVIII в.), но все необходимое для ее решения было уже сделано Гюйгенсом. Было бы утомительно описывать последовательные ступени усовершенствования часов Гюйгенса; вполне достаточно будет, если мы укажем основные идеи его конструкции и дадим описание окончательной их формы.

По существу идея Гюйгенса заключается в следующем:

1° Регулирование часов при помощи билянца заменяется маятниковым.

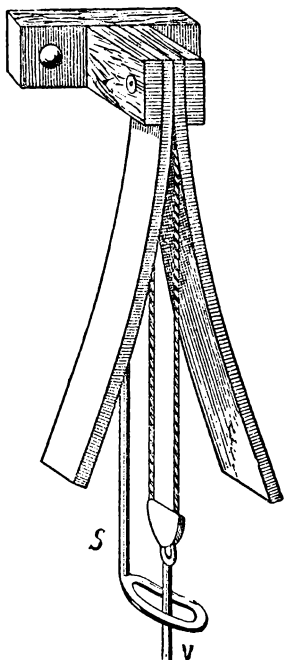
2° Маятник не соединен жестко с часовыми механизмами, но движется совершенно свободно, будучи подвешен на нитке между двумя направляющими пластинками (щеками), для того, чтобы уменьшать длину маятника при его больших размахах (в целях сохранения изохронности колебаний). Форма этих щек сначала определялась Гюйгенсом эмпирически, но потом он нашел, какую форму должны они иметь с точки зрения теории.

Следующие три рисунка — фиг. 20, 21 и 22 — дают представление о часах Гюйгенса в том виде, какой они получили к 1673 году, когда вышло его основное произведение «Часы с маятником». На фиг. 20 показан механизм часов в том виде, как он представляется сбоку. Мы видим маятник, стержень *VV* которого проходит через вилку *S*, скрепленную с горизонтальным валом *M*. На этом валу сидят палетки *LL*, сцепляющиеся с «коронным» колесом *K*. Работа этих палеток и маятника *X* совершенно аналогична той, которую выполнял билянец

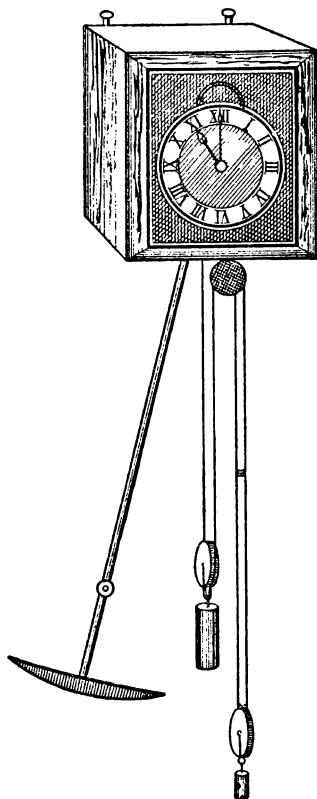


Фиг. 20

в старых часах с гирями. «Коронное» колесо при помощи зубчатого зацепления передает свое движение стрелкам, которые вращаются вокруг центра циферблата *АА*. На шкив *DD*, снабженный расположенными по окружности зубцами, надевается несущая гири цепь (не показана на рисунке), создающая движущую



Фиг. 21



Фиг. 22

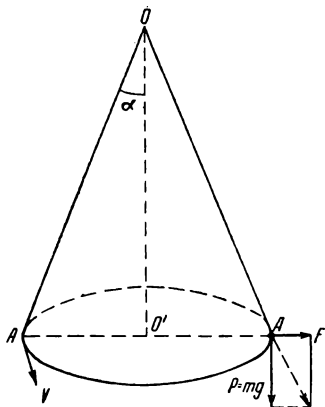
силу, поддерживающую как ход часов, так и колебания маятника.

На фиг. 21 мы видим детали крепления маятника. Конец стержня *V*, через который проходит вилка *S*, прикреплен к двойному шнуру, который может колебаться между двумя щеками.

На фиг. 22 показан общий вид часов спереди. Обращает на себя внимание вид показанной в разрезе чечевицы маятника. Гюйгенс придумал ей такую форму, чтобы уменьшить сопротивление воздуха при качаниях.

VIII

В 1659 году — тридцатом году жизни — Гюйгенс достиг еще одного замечательного результата. После того как Гюйгенс уже получил привилегию на часы с маятником, он не переставал работать над их усовершенствованием и осенью 1659 года предложил еще одну систему для измерения времени, а именно, так называемый конический маятник.



Фиг. 23

представляет тяжелую материальную точку A веса P , подвешенную при помощи нити OA длины l к неподвижной точке O . Грузу A сообщают подходящую горизонтальную скорость v так, чтобы равнодействующая его веса P и центробежной силы F имела направление нити OA , образующей с вертикалью

угол α . При надлежащем выборе скорости v и угла α точка A будет, двигаясь равномерно, описывать горизонтальные окружности вокруг вертикали OO' , проходящей через точку O прикрепления нити, причем время полного оборота, если мы отвлечемся от каких-нибудь сопротивлений, должно быть также постоянным, как время колебания математического маятника. Относительно этого способа измерения времени в манускрипте A Гюйгенса имеется запись: «Изобретено 5 октября 1659».

Это открытие Гюйгенса важно для нас не столько с точки зрения его практических приложений, сколько потому, что с открытием этого маятника связана большая теоретическая работа Гюйгенса «О центробежной силе».

Конечно, явления, связанные с действием центробежной силы, были известны и в древности. Птолемей поль-

зовался ими для доказательства невозможности того, чтобы Земля вращалась вокруг своей оси. Вычислениями, опровергавшими утверждение Птолемея, что при вращении Земли все находящиеся на ее поверхности тела были бы сброшены в небесное пространство, занимался Галилей, но только Гюйгенсу удалось довести эти исследования до такой степени, что их результаты вошли необходимой составной частью в золотой фонд механической науки. Конечно, нельзя сказать, что поднятый Гюйгенсом вопрос был совершенно исчерпанным. Еще и в настоящее время иногда в технических учебных заведениях поднимаются вопросы о реальности или фиктивности так называемой центробежной силы инерции. Поэтому более детальный разбор сочинения Гюйгенса «О центробежной силе» будет полезным и для современности.

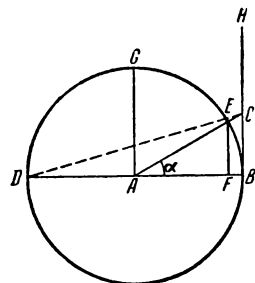
Книга Гюйгенса открывается словами: «тяжесть есть стремление опускаться вниз». Словом «стремление» мы переводим латинский термин «*conatus*», который во времена Гюйгенса имел специальное значение, смысл которого нам нужно разобрать детальнее. Словом «*conatus*» механик конца XVII в. обозначал движение, которое готово совершиться, но совершению которого что-то мешает. Лейбниц в своих ранних произведениях сравнивал отношение *conatus* к совершившемуся движению с отношением точки к линии, началом которой первая служит. «Итак, когда тяжесть подвешена на нити, она натягивает нить вследствие того, что тяжелое тело стремится (*conatur*) отойти по направлению нити равноускоренным движением известного вида». Таким образом, *conatus* чувствуется не столько в самом движении, сколько в сопротивлении последнему. «Поэтому (в движении по наклонной плоскости.— *И. В.*) чувствуется меньшее стремление (*conatus*), которое будет во столько же раз меньше стремления по отвесу, во сколько раз проходимое в одно и то же время расстояние по наклонной плоскости будет меньше расстояния, которое пройдет тяжелое тело, двигаясь по вертикали».

«Это же стремление имеет место, если в связи с представлением возможности, или когда стремление не задерживается, то же самое произойдет относительно движения. Поэтому движение нужно (для численного определения *conatus*.— *И. В.*) рассматривать только в самом

начале, взявши сколь угодно малый промежуток времени». Мы получаем способ измерения «стремления». Нужно предоставить телу начать двигаться и исследовать получающееся равноускоренное движение. Здесь мы сталкиваемся еще с одной замечательной идеей Гюйгенса. Действие силы может быть измерено тем ускоренным движением, которое получается под ее влиянием. Если бы мы хотели выразить это в современных терминах, то получили бы первую половину второго закона Ньютона «действие силы измеряется производимым ею ускорением» (во времена Гюйгенса термин «ускорение» еще не существовал, и более подходящая к его времени форму-

лировка была бы такова: «каждая сила характеризуется движением, в котором пройденные пути возрастают пропорционально квадрату времени»).

После этого Гюйгенс переходит к определению величины центробежной силы (фиг. 24): «Теперь посмотрим, какое и какой величины стремление удалиться от центра имеется у тел, прикрепленных к вращающейся нити или колесу.



Фиг. 24

Пусть колесо BG вращается в горизонтальной плоскости вокруг центра A ; если к его окружности привязан шарик, то последний, придя в точку B , будет иметь стремление двигаться по прямой BH , касательной в B к колесу... Здесь с первого взгляда трудно себе представить, по какой же причине будет натягиваться нить AB , если шарик стремится двигаться по прямой BH , перпендикулярной направлению нити AB ».

Дальнейшие вычисления мы изложим уже на современном языке. Для определения величины «центробежного стремления» нужно установить закон движения по продолжению EC , вращающегося радиуса, когда последний занимал бесконечно близкое положение к первоначальному (AB), иными словами, когда угол BAC был бесконечно близок к нулю. Пусть время соответствующего перемещения из B в E будет t , а скорость движения шарика B , когда он был привязан к окружности, или окружная скорость колеса BG , будет v . Опустим из точки E перпендикуляр EF на AB и соединим E с дру-

гим концом диаметра D . Если угол BAC обозначим через α , то:

$$EC = \frac{FB}{\cos \alpha}.$$

Поскольку α близко к нулю и $\cos \alpha = 1$, мы получаем

$$EC = FB.$$

Дуга BE будет равна vt . Заменяв ее хордой BE и воспользовавшись известной теоремой о пропорциональных линиях в круге, получим:

$$BE^2 = FB \cdot BD,$$

откуда, если радиус $AB = R$:

$$FB = \frac{BE^2}{BD} = \frac{(vt)^2}{2R}.$$

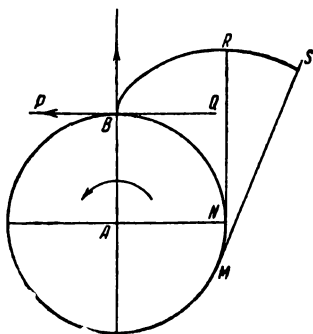
Мы видим, что закон движения по EC выражается формулой

$$EC = \frac{v^2}{R} \cdot \frac{t^2}{2},$$

иными словами, движение по EC будет равноускоренным с ускорением $\frac{v^2}{R}$.

Вычисление заканчивается словами: «Таким образом ясно, что это стремление совершенно подобно тому, которое ощущается, когда шарик удерживается подвешенным на нити, поскольку и в этом случае он стремится точно также равноускоренным движением уйти по направлению самой нити».

После этого Гюйгенс показывает, что для вращающегося колеса это «отступательное» движение совершается не по прямой, имеющей направление радиуса, а «по некоторой кривой» (фиг. 25), которая касается этой прямой в той же самой точке B , где стоит наблюдатель. Действительно, если колесо в точке B касается плоскости PQ ,



Фиг. 25

которая соединена с колесом и вместе с ним вращается, то шарик B , отделившись от колеса или упомянутой плоскости, опишет по отношению к ней при дальнейшем движении этой плоскости и шарика B кривую BRS , которая коснется в B продолжения радиуса AB . Если бы мы захотели вычертить эту кривую, то следует только приложить к окружности какую-нибудь нить BNM и конец ее B вести по направлению RS так, чтобы часть ее, покинувшая окружность, оставалась бы все время натянутой... Линия эта обладает тем свойством, что, если в какой-нибудь точке N окружности мы проведем к последней касательную, которая встретится с кривой в R , то длина NR этой касательной будет равна дуге NB , что ясно из самого построения упомянутой кривой».

Гюйгенс считал построение этой кривой само собой понятным. Современному читателю, пожалуй, потребуется несколько пояснений. В точке B предполагается вращающийся вместе с колесом (против стрелки часов) наблюдатель и в ней же соскакивает шарик B , двигаясь по прямой от B к P с той же самой скоростью, которую имеет неподвижно на колесе стоящий в B наблюдатель во время обращения колеса. Траектория абсолютного движения шарика будет прямая BP , переносное движение наблюдателя будет вращение вокруг A (против стрелки часов). Мы хотим определить относительное движение шарика, т. е. его траекторию по отношению к колесу. Для этого воспользуемся принципом Коперника: относительное движение двух тел не изменится, если мы обоим им сообщим одно и то же движение. Пусть это движение будет вращением вокруг A с такой же угловой скоростью, но только по стрелке часов. Тогда колесо AB остановится, а прямая QP будет вращаться вокруг A по стрелке часов, оставаясь все время касательной к колесу. Пусть точка B перейдет в N . Тогда прямая BP займет положение NR . Так как шарик двигался по этой прямой (в абсолютном движении) со скоростью, равной окружной скорости колеса, то он уйдет от точки B (или N) на расстояние равное тому, на какое точка B переместилась по колесу, т. е. как раз на длину дуги BN .

Свое введение Гюйгенс заканчивает следующими словами:

«Разобранное нами стремление совершенно подобно тому, с каким подвешенные на нити тяжелые тела

стремятся двигаться вниз. Отсюда, между прочим, мы заключим, что центробежные силы неравных тел, движущихся с одинаковой скоростью по равным кругам, относятся между собой как тяжести движущихся тел, или их массы (*quantitates solidae*).

Если термин «*quantitas solida*» понимать как «количество твердого вещества», т. е. «массу», то мы имеем и вторую половину второго закона Ньютона: «Силы, действующие на движущиеся тела, относятся как их массы и ускорения».

Это станет еще более ясным, если мы приведем следующее место из «Трактата о свете», опубликованного в 1690 году, но написанного, как говорит сам Гюйгенс, двенадцатью годами ранее, т. е. в 1678—1679 годах. В самом начале третьей главы («О преломлении») он пишет:

«...если верно..., что для сообщения некоторой горизонтальной скорости различным телам требуются силы пропорциональные содержащейся в них сплошной материи, и если отношение этих сил будет одинаково с отношением весов тел, что подтверждается опытом, то количества материи, образующей эти тела, будут тоже пропорциональны их весам. Но мы видим, что вес воды составляет приблизительно лишь четырнадцатую часть веса одинакового количества ртути; следовательно, материя воды не заполняет и четырнадцатой части пространства, занимаемого ее массой».

Мы видим, что Гюйгенс считал составляющую все тела материю одинаковой. Различие заключалось лишь в том, как плотно будет уложена материя в каждом отдельном теле. Таким образом, равенство

quantitas solida = *massa* (в современном смысле этого слова)

можно считать доказанным. Равным образом видно, что Гюйгенс считал массы тел пропорциональными их весам.

После того как мы подробно разобрали введение Гюйгенса, нам вполне достаточно будет ограничиться немногими словами относительно остального текста. Первые

четыре предложения в современном обозначении равносильны формуле:

$$F = \frac{mv^2}{R},$$

где v — скорость движения по окружности, R — радиус последней, а m — масса движущейся точки. Интересна формулировка предложения 5:

«Если тело движется по окружности круга со скоростью, которую оно получает при падении с высоты, равной четверти диаметра, то это тело будет иметь центробежное стремление равное своей тяжести, т. е. будет одинаково сильно натягивать нить, на которой будет подвешено».

Остальные предложения касаются теории конического маятника. В современных обозначениях задача решается так:

Для того чтобы конический маятник совершал одинаковые колебания вокруг вертикали OO_1 (фиг. 23), необходимо, чтобы равнодействующая веса и центробежной силы F имела направление нити OA . Если радиус O_1A обозначим через r , то это условие равносильно требованию:

$$F = mg \operatorname{tg} \alpha,$$

где F — центробежная сила. Имеем:

$$\frac{mv^2}{r} = mg \operatorname{tg} \alpha, \quad v = \sqrt{gr \operatorname{tg} \alpha}.$$

Так как длина окружности, по которой движется точка A , равна $2\pi r = 2\pi l \sin \alpha$, то период обращения маятника будет:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g} \operatorname{ctg} \alpha} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g} \cos \alpha}.$$

Если $\alpha = 0$, то конический маятник переходит в обычный маятник с весьма малыми колебаниями, период которых будет:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Интересна дальнейшая судьба этой книги. Ее предложения без всяких доказательств были опубликованы в последней части «Часов с маятником», вышедшей в свет в 1673 году. Что касается самой книги, то она не

только не была опубликована самим Гюйгенсом при жизни, но даже не была включена в составленный Гюйгенсом список тех его произведений, которые он завещал опубликовать после смерти: правда, его душеприказчики Фольдер и Фуллениус не удержались и эту книгу опубликовали.

Возможно, что неупоминание этой книги объясняется простой забывчивостью Гюйгенса, но может быть дело было значительно более серьезным. Мы видели, что Гюйгенс уже обладал двумя из основных законов Ньютона, иными словами, он имел в своем распоряжении весь механический аппарат для создания динамики точки. (Третья аксиома Ньютона — закон равенства действия и противодействия нужен лишь для механики системы точек.) Можно спросить, что же удержало его от создания системы динамики, к которой он стремился всю жизнь, но которую так и не создал, уступив эту честь Ньютону. Ответ, по-видимому, заключается в том, что Гюйгенс так и не мог решить до конца вопроса, какое же движение можно назвать абсолютным. Вопрос о том, что прямолинейное и равномерное движение не может быть замечено наблюдателем, движущимся вместе с обладающей таким движением системой отсчета, был вполне ясен как для Гюйгенса, так и для Ньютона. Но как обстоит дело с вращательным движением или круговым, как его тогда называли? Ньютон считал, что такое движение можно считать абсолютным, существующим независимо от системы отсчета: например, доказательство вращения Земли можно видеть в том, что последняя имеет форму сжатого эллипсоида вращения. Такого мнения, между прочим, долго держался и сам Гюйгенс, определявший влияние центробежной силы на величину ускорения силы тяжести на различных широтах, а также приписывавший сплюснутость Земли именно развивающимся при ее вращении центробежным силам. Однако под конец жизни Гюйгенс изменил свое мнение.

Лейбниц 22 июня 1694 года пишет ему: «Мне, однако, кажется, что и Вы сами когда-то придерживались мнения г-на Ньютона относительно кругового движения». Гюйгенс отвечает ему (24 августа 1694 года):

«Что касается абсолютного и относительного движения, то я удивляюсь Вашей памяти, так как Вы вспомнили, что когда-то я придерживался мнения г-на Нью-

тона относительно кругового движения. Это верно. и всего лишь 2 или 3 года тому назад я нашел другое более истинное решение, от которого, по-видимому, и Вы теперь не слишком удалены, если только не считать, что Вы хотите, чтобы, когда несколько тел имеют по отношению друг к другу относительные движения, то каждое из них имеет какую-нибудь степень истинного движения, или силы, в чем я с Вами несколько не согласен».

Еще более ясно он высказывается в письме к Лейбницу от 29 мая 1694 года:

«Скажу Вам только, что в Ваших заметках относительно Декарта я нашел, что Вы считаете «нелепым, чтобы не имелось никакого истинного движения, но существовали бы лишь относительные». Но это как раз то, что я считаю вполне установленным; меня не останавливают ни рассуждения, ни эксперименты Ньютона в его «Началах философии»; я знаю, что он ошибается и мне хочется посмотреть, не отречется ли он в новом издании этой книги, которое должен дать Давид Грегори. Декарт недостаточно разобрался в этом вопросе».

Теория Ньютона, относящаяся к абсолютному пространству и движению, изложена в первой схолии его «Начал». «Эксперимент», на который указывает Гюйгенс, есть не что иное как знаменитый опыт с ведром, наполненным водой и подвешенным на длинной закрученной веревке. При помощи этого опыта с вращающимся ведром Ньютон доказывает, что поднятие воды у стенок ведра объясняется не относительным движением воды по отношению к этим стенкам, но «истинным и абсолютным» вращательным движением, которое мало-помалу распространяется в жидкости, начиная от стенок, как только ведро начинает вращаться. Наличие центробежных сил, заставляющих частицы воды как бы «отходить от оси вращения», и является для Ньютона критерием абсолютности движения.

К сожалению, ни в рукописях Гюйгенса, ни в его переписке не удалось найти ничего, что могло бы позволить исследователю уточнить это замечательное утверждение великого голландца. Зато мы знаем, какого рода мысли

по поводу опыта Ньютона зародились у ученых XIX и XX вв., примерно через двести лет после того, как были написаны Гюйгенсом вышеупомянутые строки. На недостаточность опыта Ньютона обратил внимание прежде всего Мах в своей книге «Механика в ее развитии». Так как во второй половине XIX в. материальной системой отсчета, по отношению к которой, как находящейся в покое, определялись движения всех тел, считалась система всех неподвижных звезд, то Мах указал, что причиной поднятия воды у стенок вращающегося сосуда является все же *относительное* движение воды по отношению к совокупности неподвижных звезд, и что совершенно неизвестно, какие явления наблюдались, если бы ведро с водой было неподвижным, а вокруг него вращалась бы вся совокупность неподвижных звезд. Конечно, всей силы своего замечания Мах еще не представлял, но через несколько десятков лет это место в его книге попало на глаза гениальному мыслителю Альберту Эйнштейну и было для него толчком к созданию общей теории относительности. Конечно, модернизация представлений Гюйгенса в этом вопросе вообще недопустима, но трудно отделаться от впечатления, что родившиеся у Гюйгенса мысли были очень близки к соображениям Маха. Однако окончательного решения этого вопроса Гюйгенс сформулировать не мог и, по-видимому, не случайно, что в числе произведений, которые он завещал опубликовать после своей смерти, он не включил трактата «О центробежной силе». Хотя теперь в середине XX в. после создания общей теории относительности мы знаем, что в рассматриваемом вопросе был прав Гюйгенс, а не Ньютон, но именно «гениальная ограниченность» последнего позволила ему создать систему механики, на которой основаны почти все технические достижения последних двух с половиной веков, тогда как необычайная требовательность и прозорливость Гюйгенса привела к тому, что его система механики, для создания которой не хватало только третьего закона Ньютона, так и осталась незаконченной.

IX

С осени 1660 года в жизни Гюйгенса начинается период странствий. Он выехал из Гааги 12 октября и после кратковременного пребывания в Антверпене прибыл в

Париж, где его с восторгом приняли старые знакомые по первой парижской поездке Шаплен, Монмор и другие, но отношения со старыми друзьями уже начали несколько меняться. Девятого ноября он был на собрании у Монмора вместе с астрономом Озу и математиками Френиклем и Дезаргом. Об этом собрании он написал письмо брату Константину. Само письмо не сохранилось, но оно произвело такое впечатление на Константина, что последний пересказал его содержание младшему брату Лодивику. В соответствующем письме (18 ноября 1660 года) Константин пишет:

«Брат сообщил из Парижа, что он был на собрании у г-на Монмора, где присутствовало около 30 великих умов. На собрании говорилось лишь на одну тему, «существует ли в действительности геометрическая точка». Это положение защищал в длинной речи г. Дезарг, которого вы знаете. Он вызвал противника, который начал противоречить ему с такой яростью, что они, казалось, были готовы вцепиться друг в друга, и больше ни о чем на собрании не говорилось».

Одновременно Константин писал брату в Париж:

«У нас получается не очень хорошее мнение о разумности этих господ академиков, которые с терпением готовы целыми часами слушать болтовню педантов о вещах, которые ничего не стоят».

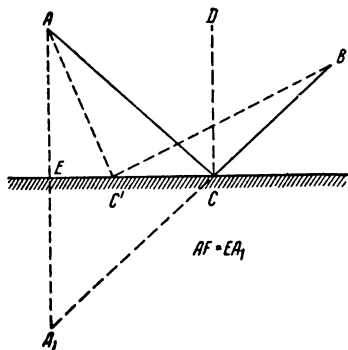
В Париже Гюйгенс познакомился с Паскалем и получил письмо от величайшего французского математика того времени Пьера Ферма. Последний писал:

«Я узнал с радостью, но не без некоторой зависти, что мои парижские друзья имеют честь видеть Вас у себя некоторое время. Я уверяю Вас, что если бы мое здоровье было настолько крепко, чтобы выдержать путешествие, то я с величайшим удовольствием отправился бы принять участие в их счастье. Ведь я уверен в Ваших необыкновенных способностях не только с сегодняшнего дня и не только по рекомендациям г-на Каркави. Я был Вашим, прежде чем Вы приехали во Францию. И когда спросили моего мнения о Вашей системе Сатурна, то я смело отвечал,

даже не заглянув в Вашу книгу, что, поскольку она вышла из Ваших рук, она никоим образом не могла не быть совершенной. Говорить таким образом меня заставили другие Ваши произведения, которые я прочел и которыми восторгался».

К сожалению, с Ферма, умершим в 1665 году, у Гюйгенса более близких отношений не завязалось. Основными работами Ферма являются его исследования в области теории чисел (между прочим, великая теорема Ферма, состоящая в том, что уравнение $x^n + y^n = z^n$ при $n > 2$ не может иметь целых решений) и, кроме того, установленный Ферма принцип

наименьшего действия, а именно, что свет при своем распространении всегда требует наименьшего времени. Для отражения это было известно еще древними. Если угол падения ACD равен углу отражения $B CD$ (фиг. 26), то свет для своего распространения из A в B требует кратчайшего времени (если отложим $AE = EA_1$, то сумма расстояний $AC + CB$ будет равна в этом случае



Фиг. 26

прямолинейному отрезку A_1CB , т. е. будет наименьшей из всех других сумм типа $AC' + C'B$). Ферма показал, что если считать коэффициент преломления равным отношению скоростей света в обоих соприкасающихся при преломлении средах, то тот же самый принцип остается справедливым и для преломления. Гюйгенс не придавал большого значения этому принципу. О доказательстве Ферма он пишет 22 июня 1662 года, что оно «хорошо и изящно, но предполагаемые им для преломления принципы, относящиеся не к геометрии, а скорее к физике, совсем не являются твердо установленными и даже определенно спорными». Однако, возможно, что Ферма в дальнейшем навел его на мысль, что скорость света является большей в менее плотных средах (Декарт и Ньютон держались противоположного мнения). Равным образом Гюйгенс не сочувствовал исследо-

ваниям Ферма в области теории чисел, не считая подобные работы имеющими какое-нибудь практическое значение.

Весной 1661 года Гюйгенс поехал в Англию и 2 апреля приехал в Лондон. Лондон не произвел на него хорошего впечатления: в письме к брату Лодевику (от 9 июня 1661 года) он жалуется на «невыносимый запах дыма», на то, что «город плохо построен и имеет узкие и плохо вымощенные улицы». «Народ там очень меланхоличен, люди с положением достаточно вежливы, но малообщительны... женщины не так остроумны и веселы, как во Франции». Но тем не менее лондонские ученые произвели очень хорошее впечатление и среди них он нашел больших и лучших друзей, чем у французов. Это было время, когда закладывались основы лондонского Королевского Общества (оно получило королевскую учредительную грамоту 15 (25) июля 1662 года). Уже через четыре дня после приезда (6 апреля) «мы пошли на собрание в Грешэмский колледж, где председательствовал мистер Роберт Морэ, обратившийся ко мне с приветственной речью». Роберт Морэ (1610—1673), получивший воспитание во Франции, где он пользовался расположением знаменитого кардинала Ришелье, был одним из основателей и первым президентом Королевского Общества. В дальнейшем он вел оживленную и дружескую переписку с Гюйгенсом. Кроме него, Гюйгенс познакомился с математиком лордом Брункером (позднее тоже президентом Общества), пытавшимся без особого успеха доказать изохронность колебаний циклоидального маятника, непререкаемым секретарем Королевского Общества Ольденбургом, знаменитым физиком Бойлем и др. Гюйгенс показал сделанные им самим стекла своего большого телескопа, которые оказались значительно лучшими тех, которые имелись у англичан, так что Гюйгенсу пришлось рассказать, каким образом он их приготовил.

Особенное впечатление на Гюйгенса произвел имевшийся у Бойля воздушный насос.

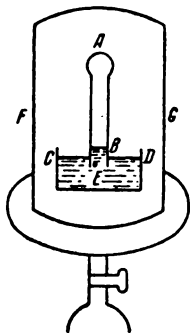
«Члены новой физической Академии, которая собирается в Грешэмском колледже, показали мне значительное количество интересных опытов с пустотой, которую они получают не при помощи ртути в маленьких трубках (по методу Торричелли.— *И. В.*), но вы-

тягивая некоторым насосом весь воздух из большого стеклянного сосуда, куда они помещают сначала животное, или какие-нибудь другие вещи».

Роберт Бойль (1627—1691), с которым познакомился Гюйгенс, был человеком с весьма разносторонними интересами: он занимался и религиозно-философскими вопросами, и вместе с тем очень много сделал в области развития экспериментальной физики и химии. Деятельность его в значительной мере известна любому ученику средней школы. Он усовершенствовал воздушный насос, установил носящий его имя закон относительно зависимости между объемом и давлением воздуха и сделал много важного в расчистке химии от ложных представлений, носивших алхимический оттенок. И вместе с тем основное значение Бойль имеет как экспериментатор (это по существу можно сказать и относительно всех других деятелей начального периода существования Королевского Общества. Гюйгенс пишет о них Шаплону 14 июня 1661 года, что Королевское Общество «более придерживается того, чтобы делать опыты, чем рассуждения»). Получив известие о смерти Бойля, он сообщает Лейбницу (4 февраля 1692 года): «Кажется весьма странным, что он ничего не построил на основе такого количества опытов, которое заполняет его книги; но это дело очень трудное, и я никогда не считал его способным на такое большое прилежание, которое необходимо для того, чтобы установить правдоподобные принципы». И все же это не помешало Бойлю иметь известное влияние на научную деятельность Гюйгенса. В конце 1661 года Гюйгенс строит собственный воздушный насос, с которым начинает серию опытов. Первоначально он делал его вместе со старшим братом Константином, постоянным его помощником в оптических и астрономических занятиях, но скоро брат отказался от дальнейшего участия «из боязни издержек; так что, — пишет Гюйгенс младшему своему брату Лодевику, — если я захочу, то он может смотреть мои опыты только за деньги». 30 ноября 1661 года он пишет Лодевику: «Мой воздушный насос со вчерашнего дня начал работать; всю эту ночь положенный в него пузырь оставался надутым (хотя перед этим в нем почти совершенно не было воздуха), а этого господин Бойль никогда не мог получить».

Когда Гюйгенс познакомился с законом Бойля, то он вывел на его основании закон изменения плотности атмосферного воздуха с высотой (так называемую барометрическую формулу) и сообщил построенную на его основании таблицу членам Королевского Общества, которые остались ею очень довольны.

Из многочисленных опытов Гюйгенса с воздушным насосом представляет особый интерес один, который имел значение для космических теорий Гюйгенса. Сущность наблюденного им явления полностью не раскрыта и до сих пор. Вот как он описывает это явление (фиг. 27) в письме к другу своему Слюзу (25 сентября 1662 года):



Фиг. 27

«Возьмем стеклянную колбу AB с вытянутой шейкой, наполним ее водой и поместим открытым горлышком вниз в сосуд, наполненный до половины водой; все это покроем большим стеклянным сосудом FG . Тогда если выкачать воздух из сосуда FG , то вода из повернутой отверстием вниз колбы опустится в подставленный снизу сосуд до тех пор, пока вода внутри колбы и вне ее не остановится на одном уровне, если, конечно, будет хорошо работать насос.

Когда я захотел сделать этот опыт с водой, очищенной от воздуха (заставив ее всю ночь простоять внутри сосуда FG , из которого был выкачан воздух, так что из нее выделилось громадное количество пузырьков), то вода уже не опускалась как раньше из колбы AB , хотя бы из FG воздух и был выкачан; этот опыт у меня удался около двадцати раз.

Однако, когда вода уже долго упорно так стояла, если в самом низу внутри колбы появлялся ничтожнейший и еле видный пузырек E , то он, увеличиваясь понемногу, подымался кверху; как только он достигал уровня приблизительно на один дюйм выше поверхности воды CD , то отсюда он сразу вытягивался вверх, причем нижнее его основание оставалось на месте так, что почти мгновенно заполнял всю колбу и горлышко, а вся вода быстро выходила вбок в сосуд CD и внутри трубки оставалась самое большее на один дюйм выше уровня воды в сосуде CD . Если

после этого впустить в сосуд FG воздух, то последний снова заставлял воду подняться внутри колбы AB , но так, что наверху оставался маленький пузырек воздуха величиной в конопляное семечко; этот воздух, по-видимому, появлялся из воды; я думаю так главным образом потому, что, если оставить так колбу, то через 24 часа, или даже меньше, этот пузырек исчезал».

Когда Гюйгенс сообщил об этом опыте Шаплону, то последний дал такое объяснение. Он, как приверженец атомизма, считает, что атомы огня более подвижны, чем атомы воздуха, атомы воздуха подвижнее атомов воды и самыми неподвижными являются атомы земли. Примесь атомов огня очень сильно увеличивает подвижность атомов воздуха, то же самое можно сказать относительно атомов воды в смеси с воздухом. Атомы огня имеют форму шариков, атомы воздуха — пирамид, атомы воды имеют вид небольших призм, а атомы земли похожи на ежиков, чем и объясняется сцепление частиц земли друг с другом. Наоборот, сферичность атомов огня устраняет возможность какого-либо сцепления, а пирамидальные атомы воздуха могут проникать и в другую среду. В опыте Гюйгенса вода в смеси с воздухом падала вниз вследствие подвижности воздуха, без воздуха же атомы воды упирались своими призматическими основаниями в стенки сосуда и задерживались, образуя достаточно плотные тела. Напрасно Гюйгенс говорил ему, что горлышко колбы является слишком широким, чтобы в нем могли застрять атомы, Шаплен держался своего объяснения.

Если воду заменить ртутью, то опыт долго не удавался, но в конце концов был выполнен Робертом Гуком в 1673 году (ртуть точно также кипячением была лишена воздуха). Гук объяснял это явление прилипанием частиц жидкости к стенкам сосуда, сцеплением частиц жидкости между собой и, наконец, давлением некоторой «тонкой материи». Последнего объяснения придерживался и сам Гюйгенс, который различал несколько видов «тонкой материи»; в частности он объяснял сцепление твердых тел давлением этой «тонкой материи».

В зрелом возрасте Гюйгенс держался следующих воззрений на материю. Как и Шаплен, он был атомистом. Не отрицая принципиально пустоты, он отрицал действие

на расстояние: в этом заключается основная противоположность его механики механике Ньютона. Он различал четыре вида материи:

1° обыкновенную материю, частицы которой не обладают особой подвижностью;

2° светоносный эфир, который увлекался движением Земли и других планет;

3° магнитную материю, вихревые движения которой производили явления магнетизма;

4° «тонкую материю», частицы которой могли двигаться совершенно свободно; действием этой материи он объяснял тяготение и сцепление твердых тел.

Нужно, между прочим, сказать, что эти философские теории Гюйгенса очень мало отражались на его физико-математических исследованиях. Читая его произведения «Часы с маятником», «Центробежную силу», «Явления удара», нельзя заметить ни малейшего следа атомизма. Равным образом, нельзя сказать, что вышеописанная классификация видов материи была у Гюйгенса доведена до вполне законченной формы. Могли быть и другие формы материи, например электрическая, но к выработке единой вполне законченной системы Гюйгенс не стремился: его девизом было «*Al te wijs kan niet beginnen*» — «Чрезмерно мудрый не может начать». Объяснение вышеописанного «явления Гюйгенса» представляет один из немногих примеров, когда Гюйгенс применял свои атомистические воззрения.

Дальнейшая история объяснения «явления Гюйгенса» может быть изложена довольно коротко.

Ньютон первоначально (1679 год) соглашался с Гюйгенсом, но позднее (1704 год) уже искал объяснения в наличии молекулярных сил (прилипание и сцепление).

Лаплас в «Небесной механике» указывал на возможную связь этого явления с капиллярностью.

Препаратор кафедры химии Гентского университета Донну (1822—1896) открыл в 1842 году это явление для серной кислоты. «Я не видел иного способа объяснить это явление, кроме как приписать его прилипанию серной кислоты к трубке и взаимному сцеплению молекул друг с другом. Однако мне было трудно остановиться на этом объяснении, так как оно противоречило общепринятым представлениям, согласно которым упомянутые притяжения не могли бы произвести такие заметные результаты».

Этим же вопросом занимались также и другие ученые (Гельмгольц, 1888 г.), однако вопрос не является полностью решенным и в настоящее время¹.

Х

Следующие годы (1663 и 1664) застают Гюйгенса снова в странствиях. Когда его английский друг Морэ в письме от 19 января 1663 года дружески упрекает его за то, что «Вы заставляете нас так долго ждать, доводя даже до крайнего нетерпения, трактаты о движении и диоптрику, которые, как мы думаем, Вы обязаны публике Вашим обещанием, если не считать побуждения такого числа Ваших покорных слуг». Гюйгенс отвечает (2 февраля 1663 года): «Если я так медлю с выполнением сделанного мной обещания относительно работ по диоптрике и других, то я прошу Вас верить, что все это к моему большому сожалению. Но столько вещей прерывает меня в моих занятиях, что я могу подвигаться лишь мало-помалу. Вот теперь еще это путешествие во Францию, которое отнимет у меня несколько месяцев».

Гюйгенс действительно уехал 23 марта 1663 года. После кратковременного пребывания в Париже он едет в Лондон, где 27 июня 1663 года он был избран членом Лондонского Королевского Общества. По возвращении в Париж он получает 1 октября от Людовика XIV премию в 1200 ливров за изобретение часов с маятником. Наступает второй период работы над усовершенствованием маятника. В первую очередь надо было проверить, насколько часы Гюйгенса могут служить для определения долготы в тех условиях, которые действительно имеют место на море. Соответствующие опыты производились еще в 1662 году, когда хороший английский знакомый Гюйгенса Александр Брюс (позднее граф Кинкардин) произвел несколько испытаний во время плавания между Голландией и Англией. Опыты большим успехом не увенчались, но Гюйгенс приобрел еще одного претендента на изобретение часов: Брюс захотел быть

¹ Интересующиеся этим вопросом читатели могут познакомиться с библиографией, помещенной в 19-м томе (стр. 242) национального издания сочинений Гюйгенса (*Oeuvres Complètes de Christiaan Huygens publiées par la Société Hollaandaise des Sciences, t. XIX, La Haye, 1937*).

соавтором. Это привело к тому, что отношения испортились. Если в 1656 году Гюйгенс довольно равнодушно относился к денежной стороне дела, то теперь положение изменилось, так как зависимость от отца начала уже тяготить Гюйгенса. В конце концов Гюйгенс получил привилегии для Голландии (5 декабря 1664 года), для Англии (3 марта 1665 года) и для Франции (5 марта 1665 года). Что касается английской привилегии, то распределение доходов было произведено так: 50% шло в пользу Королевского Общества, а по 25% получили Гюйгенс с Брюсом.

В июне 1664 года Гюйгенс возвратился в Гаагу и осенью того же года закончил свои работы по определению центра качания физического маятника.

Стоявшая перед Гюйгенсом задача заключалась в следующем. Все сделанные до сих пор его открытия касались так называемого математического маятника — шарика небольших размеров, качавшегося на нити или на тонком стержне, причем можно было пренебрегать как размерами шарика, так и весом поддерживающей его нити или стержня. Реальный маятник, конечно, имеет чечевицу значительных размеров и его стержень тоже обладает весом, пренебрегать которым уже невозможно. Таким образом, надо было решить более общую задачу — определить период колебания тяжелого твердого тела, которое качалось бы вокруг неподвижной горизонтальной оси, не проходившей через его центр тяжести (такое тело и носит название физического маятника). Наиболее простое решение этой задачи сводилось к следующему: надо заменить рассматриваемый физический маятник математическим, имеющим ту же самую точку привеса и колеблющимся с тем же самым периодом. Если длину такого математического маятника отложить от точки привеса по прямой, проходящей через центр тяжести физического маятника, то конечная точка этой прямой совпадет с некоторой точкой физического маятника, которая и носит название его *центра качания*. Можно сказать, что физический маятник мы заменяем математическим, длина которого равняется расстоянию от точки привеса до центра качания. Таким образом, в центре качания мы как будто сосредотачиваем всю массу физического маятника, заменяя его одной точкой.

Эта задача появилась перед Гюйгенсом еще в юности,

но, правда, в несколько отличной форме. Она была поставлена перед ним Мерсенном и в связи с изучением явления удара. Итальянский механик Бальди в комментариях на приписываемые Аристотелю «Механические проблемы» поставил следующий вопрос: «будет ли удар мечом более действительным, если он произведен местом, находящимся около острия, или же лучше бить местом около центра тяжести, или даже вблизи рукоятки». Решение Бальди было следующее: нужно бить местом вблизи центра тяжести. Мерсенну это решение не показалось верным и он пришел к заключению, что это место — так называемый центр удара — может быть тождественно с центром качания. Никаких рассуждений на эту тему у Мерсенна не было и он пришел к этому заключению только на основании опытов. Декарт, к которому Мерсенн обратился за отзывом, согласился с ним, и в результате появилось письмо к Христиану Гюйгенсу (8 декабря 1646 года), в котором Мерсенн между прочим пишет:

«Мне хотелось бы удовлетворить Вашему желанию в том, что относится к центру удара или центру качания подвешенных тел... но я не вижу, что все это может быть получено при помощи только одного правила, которое дал г. Декарт и которое я здесь приведу...

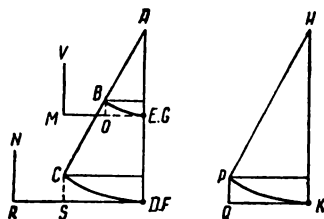
...Если я хочу определить центр колебания данного тела... я беру как бы математический маятник, т. е. груз на нити, которую я могу по желанию быстро удлинять или укорачивать..., как только я найду такую длину этой нити, что колебания ее с грузом будут совершаться в одинаковое время с колебанием подвешенного тела, например треугольника, то я могу заключить, что у этого треугольника центр удара или колебания будет в том самом месте, где конец моего математического маятника коснется площади треугольника...

...И относительно этого я жду Вашего суждения: не можете ли Вы найти доказательство этого... И если можно будет найти какое-нибудь достаточно общее правило для того, чтобы можно было определить этот центр геометрически... то Вы поставите меня об этом в известность».

На этом письме, хранившемся в его архиве, Гюйгенс сделал пометку: «Я нашел это правило в 1664 году».

Правда, этой задачей ему пришлось заниматься и немного раньше, а именно в 1661 году, когда он исследовал условия регулирования маятника при помощи второго грузика, передвигающегося по стержню маятника. Приведем (с небольшими сокращениями) запись, которую сделал Гюйгенс в своем манускрипте *B* (фиг. 28):

«Возьмем негибкий стержень *AD*, к которому прикреплены грузы *D* на самом его конце и *E* где-нибудь между *A* и *D*. Требуется найти простой маятник *HK*, совершающий колебания изохронные со сложным маятником *AED*, если даны веса грузов *E*, *D* и расстояния *AD*, *AE*. Для того чтобы найти основные принципы этого вычисления, вообразим, что шарики *E*, *D*, совершив половины своих колебаний *BE*, *CD*, встретятся с



Фиг. 28

равными им шарами *G* и *F*; и те, и другие мы предполагаем абсолютно твердыми; тогда первые передадут все свои движения вторым и маятник *AD* останется неподвижным. Если в свою очередь шары *G* и *F* возвратятся с теми же скоростями, которые они получили, и ударят шары, находящиеся в *E* и *D*, то те опять воспримут от первых полностью скорости и согласно установленным нами законам движения подымутся по дугам *EB*, *DC*, по каким раньше опускались, и увлекут за собой стержень в положение *AC*. Отсюда следует, что центр составленной из шаров *G*, *F* тяжести, после того, как они получили скорости от *E* и *D* ...подыметя на ту же самую высоту, на которой находится центр тяжести шаров *B* и *C*. Действительно, выше его он подняться не может, но также не может быть и ниже, так как в обратном движении шары *G* и *F*, двигаясь, с достигнутых высот должны сообщить движение шарам *E*, *D*, от которого эти шары подымутся, как сказано, до *B* и *C*; все это вполне ясно из законов механики.

Предположим теперь, что маятник *AED* совершает колебания одинаково быстрые с маятником *HK*; пусть длина последнего будет *x*; положим затем

$AD=a$, $AE=b$, и веса D и E равными соответственно e и c ; пусть высота CS , представляющая разность уровней C и D , будет d . Так как маятник AED движется одинаково быстро с простым маятником HK , то скорость груза D будет относиться к скорости груза K , совершившего колебания по дуге, подобной первой, как AD относится к HK , т. е. как d к x . Но груз K силой своего движения достигает высоты $QP=d\frac{x}{a}$.

Следовательно, груз D с соответствующей ему скоростью, или груз F , получивший всю скорость первого, может подняться на высоту, которая будет относиться к высоте QP , как квадрат его скорости к квадрату скорости, приобретенной грузом K . Но эти квадраты относятся как a^2 к x^2 , а высота $QP=d\frac{x}{a}$; следовательно, составив пропорцию:

$$x^2 : a^2 = \frac{dx}{a} : RN,$$

получим, что высота RN , на которую может подняться над горизонталью DS ударенный шар F , будет

$$RN = \frac{ad}{x}.$$

Равным образом определится высота, на которую подыметя ударенный шар G . Действительно, как $HK=x$ относится к $AG=b$, так будет и высота $BO=\frac{bd}{a}$ к MV — высоте, на которую подыметя G над горизонтальной линией EO :

$$MV = \frac{b^2d}{ax}.$$

Теперь, так как центр составленной из G и F тяжести после этого поднятия будет одинаково высок с центром тяжести, составленной из B и C , то необходимо, чтобы высота NR , помноженная на вес F или D , вместе с произведением высоты MN на вес G или E , т. е.

$$e\frac{ad}{x} + c\frac{b^2d}{ax}$$

равнялись бы взятые вместе сумме двух произведений — CS на вес D и BO на вес E , т. е.

$$ed + c \frac{bd}{a}.$$

Следовательно:

$$\frac{ead}{x} + \frac{b^2dc}{ax} = ed + \frac{bdc}{a}$$

$$ea^2d + b^2dc = eadx + bdcx$$

$$ea^2 + b^2c = eax + bcx$$

$$x = \frac{ea^2 + b^2c}{ea + bc}.$$

Таково общее правило для вычисления длины простого маятника, который был бы изохронным с данным сложным маятником».

В основе всего этого вывода лежит закон сохранения механической энергии.

Так как тело массы m , падая с высоты h , получает скорость $v = \sqrt{gh}$, то мы можем написать

$$mgh = \frac{mv^2}{2}.$$

Величину mgh — произведение веса тела на его высоту мы называем потенциальной энергией тела. Величину $\frac{mv^2}{2}$ мы называем кинетической энергией тела. Написанное равенство выражает, что при падении тела его потенциальная энергия mgh перешла в кинетическую.

Пусть теперь в обозначениях черт. 28:

$$AD = h_1 \quad AE = h_2 \quad HK = h,$$

равным образом массы грузов D , E , K будут m_1 , m_2 , m . Пусть угол отклонения обоих маятников от вертикали будет α . Тогда при наибольших отклонениях от вертикали (когда скорости всех грузов равны нулю) потенциальные энергии обоих маятников соответственно будут

$$m_1gh_1(1 - \cos \alpha) + m_2gh_2(1 - \cos \alpha) \\ mgh(1 - \cos \alpha).$$

Если через ω обозначим угловую скорость первого и второго маятников при прохождении ими наинизшего по-

ложения (эти скорости у обоих маятников будут одинаковы), то соответствующие скорости точек D , E , K будут ωh_1 , ωh_2 , ωh , а кинетические энергии обоих маятников:

$$\frac{m_1 \omega^2 h_1^2}{2} + \frac{m_2 \omega^2 h_2^2}{2}, \quad \frac{m \omega^2 h^2}{2}.$$

Приравнявая потенциальные энергии кинетическим, будем иметь:

$$\begin{aligned} m_1 g h_1 (1 - \cos \alpha) + m_2 g h_2 (1 - \cos \alpha) &= \\ &= \frac{m_1 \omega^2 h_1^2}{2} + \frac{m_2 \omega^2 h_2^2}{2} \\ m g h (1 - \cos \alpha) &= \frac{m \omega^2 h^2}{2}. \end{aligned}$$

Разделив почленно верхнее уравнение на нижнее, получим после очевидных сокращений:

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = \frac{m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2}{h},$$

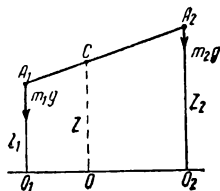
откуда получается формула Гюйгенса для расстояния центра качания:

$$h = \frac{m_1 h_1^2 + m_2 h_2^2}{m_1 h_1 + m_2 h_2}.$$

Нетрудно распространить эту формулу на случай любого количества материальных точек, лежащих на одной прямой, но мы сделаем больше и покажем, как методом Гюйгенса получить центр качания, или приведенную длину (расстояние центра качания маятника от оси вращения последнего) для любого тела, совершающего колебания вокруг некоторой неподвижной горизонтальной оси.

Предварительно покажем, как более простым образом определить потенциальную энергию для сил тяжести системы материальных точек.

Пусть A_1 и A_2 (фиг. 29) будут две материальные точки с массами m_1 и m_2 , находящиеся на высотах z_1 и z_2 над некоторой горизонтальной плоскостью $O_1 O_2$. Если бы мы захотели вычислить положение центра тяжести C этих



Фиг. 29

точек (его высоту $OC = z$), то, как нетрудно видеть из элементарной физики, мы нашли бы

$$z = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2}{m_1 + m_2}.$$

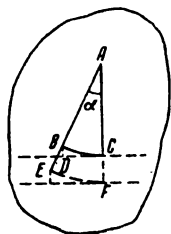
Отсюда видно:

$$(m_1 + m_2)gz = m_1gz_1 + m_2gz_2,$$

иными словами, потенциальная энергия силы тяжести двух материальных точек равна потенциальной энергии силы тяжести одной материальной точки, имеющей массу, равную сумме масс этих точек, и расположенную в центре тяжести двух этих точек. Прибавляя еще по одной точке и складывая попарно получающиеся потенциальные энергии, мы покажем, что эта формула будет справедлива для любого количества материальных точек:

$$\Sigma(mgz) = Mgz_c,$$

где z_c — представляет высоту центра тяжести всех рассматриваемых точек, а $M = \Sigma m$ — сумма всех их масс.



Фиг. 30

Теперь рассмотрим тело произвольной формы, вращающееся вокруг неподвижной горизонтальной оси A (фиг. 30). Разобьем это тело на ряд материальных точек с массами m_1, m_2, m_3, \dots , расстояния которых от оси вращения (их радиусы вращения) пусть будут соответственно r_1, r_2, r_3, \dots . Если ω — общая угловая скорость вращения тела, то скорости этих точек будут

$$\omega r_1, \omega r_2, \omega r_3, \dots$$

Пусть $M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots$ есть общая масса этого тела, а B — центр тяжести, причем расстояние $AB = a$. Отведем тело на угол α от вертикали AC и отпустим без начальной скорости. Пусть ω будет скорость, которую получит тело, когда центр тяжести B попадет в C . Проведем через C горизонтальную плоскость. Потенциальная энергия всех сил тяжести этого тела будет

$$Mg \cdot BD = Mg \cdot a(1 - \cos \alpha),$$

а его кинетическая энергия

$$\frac{m_1 \omega^2 r_1^2}{2} + \frac{m_2 \omega^2 r_2^2}{2} + \frac{m_3 \omega^2 r_3^2}{2} + \dots$$

Сравнив потенциальную энергию в положении AB с кинетической в положении AC , получаем:

$$Mg(1 - \cos \alpha) = \frac{\omega^2}{2} \Sigma mr^2,$$

где $\Sigma mr^2 = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots$ (это то, что позднее назвали моментом инерции тела относительно оси вращения A). Теперь напишем то же уравнение для маятника, длина $AE = l$ которого равна расстоянию от A до центра качения:

$$Mlg(1 - \cos \alpha) = \frac{M \omega^2 l^2}{2}.$$

Разделив почленно одно уравнение на другое, получим после очевидных сокращений:

$$l = \frac{\Sigma mr^2}{Ma}.$$

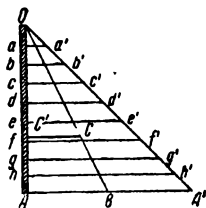
Выражения Σmr^2 — суммы произведений материальных точек на квадраты их расстояний до оси вращения — нужно было уметь находить. В настоящее время их находят при помощи интегрального исчисления — одного из разделов математического анализа.

Так как во времена Гюйгенса эта дисциплина еще не была достаточно развита (а также и потому, что сам Гюйгенс геометрию любил больше, чем алгебру), то соответствующие задачи решались им геометрически, что, конечно, требовало большого искусства.

В качестве примера мы покажем, каким образом Гюйгенс решал задачу, поставленную Бальди: определить центр качения (или удара) однородного прямолинейного стержня, подвешенного за один из концов.

Пусть этот стержень будет OA (фиг. 31) и длина его равна l . Разобьем стержень на ряд весьма малых частичек a, b, c, \dots , и положим, что масса каждой из такой частичек равна 1. В точках деления восставим перпендикуляры $aa', bb', \dots AA'$ и отложим на них соответствующие расстояния до точки O так, что:

$$aa' = Oa, \quad bb' = Ob, \quad \dots \quad AA' = OA = l.$$



Фиг. 31

Расстояние центра качания стержня от точки O определится формулой:

$$r = \frac{Oa^2 + Ob^2 + \dots + OA^2}{Oa + Ob + \dots + OA},$$

так как массу каждой точки мы приняли за единицу. Не трудно видеть, что знаменатель этой дроби представит сумму «всех aa' », иными словами, площадь фигуры OAA' . Что касается числителя, который мы можем переписать в виде:

$$Oa \cdot aa' + Ob \cdot bb' + Oc \cdot cc' + \dots + OA \cdot AA',$$

то мы согласно формуле для центра тяжести:

$$Mh_c = m_1h_1 + m_2h_2 + \dots + m_nh_n,$$

можем рассматривать его как сумму произведений «масс» aa' , bb' , ..., приложенных в точках a , b , c , ... на их расстояния до точки O . Эта сумма будет равна «массе» всей фигуры, т. е. $M = aa' + bb' + \dots + AA'$, помноженной на расстояние h_c центра их тяжести от O . Так как «массы» в числителе и знаменателе взаимно сокращаются, то дело свелось к тому, чтобы определить расстояние от O центра тяжести площади треугольника в предположении, что массы всех его полосок перенесены в соответствующие точки прямой OA . Так как центр тяжести S всего треугольника до переноса лежал на расстоянии OS , равном двум третям медианы OB , то его положение после переноса мы получим, опустив из S перпендикуляр SS' на OA . Основание S' этого перпендикуляра и будет искомым центром качания, а приведенная длина $OS' = \frac{2}{3}l$.

Такой же метод можно применить для нахождения центра качания плоской фигуры, вращающейся около оси, лежащей в плоскости этой фигуры. Рассуждая аналогичным образом, нам пришлось бы строить на этой плоскости цилиндр (не обязательно круговой), основанием которого была бы заданная фигура, рассекать этот цилиндр плоскостью, проведенной через ось вращения и образующей угол 45° с плоскостью фигуры, и искать центр тяжести полученного усеченного цилиндра, или, как его называл Гюйгенс, «копытца». Если этот центр тяжести удавалось найти, то центр качания получался в

основании перпендикуляра, опущенного из него на плоскость данной фигуры.

Результаты своих работ Гюйгенс описал следующим образом в письме к своему английскому другу Морэ (10 октября 1664 года):

«Все эти дни я был погружен в исследование... Я определял простые маятники, изохронные с треугольниками и другими фигурами и телами, подвешенными различным образом...

...Я получил общий способ для всех треугольников и прямоугольников, подвешенных за один из углов или за середину стороны. Также для подвешенных на ниточке кругов... и что было всего труднее, я нашел длину изохронного маятника для шара, подвешенного на нити, что непосредственно относится к установлению универсальной меры.

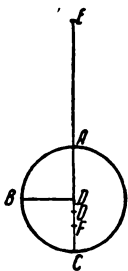
Действительно, нужно заметить, что большой шар не будет изохронным с малым, центр которого имел бы одинаковое с первым расстояние от точки подвеса. Французские математики тоже когда-то занимались этими вещами, но не могли дойти до конца, как я вижу из имеющихся у меня писем отца Мерсенна».

Интересно имеющееся здесь упоминание об «универсальной мере». У Гюйгенса, как и у его голландского предшественника Симона Стевина, а также и у Морэ, была мысль о создании такой системы мер, единица длины которой определялась бы естественным образом так, чтобы ее всегда можно было бы восстановить, если бы все имевшиеся эталоны мер пропали. В качестве такой предполагалось взять именно длину секундного маятника. Последний предполагалось осуществить в виде тяжелого шара, подвешенного на нити.

Возвращаясь к этому вопросу, Гюйгенс пишет к Морэ 21 ноября 1664 года:

«...чтобы не быть связанными определенной величиной отношения шара к длине маятника, полезно знать, что центр качания шара, подвешенного на нити произвольной длины, находится следующим образом:

Пусть дан шар ABC , подвешенный на закрепленной в E нити AE . Следует найти третью пропорциональную DF для линий ED, DB (т. е. составить пропорцию $ED : DB = DB : DF$. — И. В.) и взять DO , равную $\frac{2}{5}$ от DF ; я говорю, что O будет центром качания для подвешенного таким образом шара... Таким образом, для нахождения универсальной меры достаточно будет иметь какой угодно подвешенный шар, совершающий колебания в одну секунду или в полсекунды, причем лучше брать возможно большие и тяжелые шары вследствие наличия сопротивления воздуха» (фиг. 32).



Фиг. 32

XI

В 1666 году Гюйгенс получает приглашение стать членом Французской Академии наук и с тех пор в течение 12 лет его жизнь и деятельность связывается с Францией.

В середине XVII в. Франция стала выходить на первое место среди европейских стран, вытеснив Испанию, бывшую господствующей державой в течение второй половины предыдущего века. Благодаря деятельности короля Генриха IV, а после его смерти — кардинала Ришелье, Франция вышла из религиозных войн, ограничила политические устремления крупных феодалов и стала централизованной монархией. Наступило время, когда возникающий класс буржуазии, еще не чувствуя в себе сил вести самостоятельную политику, вступил в известного рода союз с королевской властью, результатом которого явилась абсолютная монархия. Этот королевский абсолютизм получил особенно яркое выражение во Франции, которая около 1650 года после поражения австрийских и испанских Габсбургов стала самой сильной страной Европы. Вся власть сосредоточилась в руках наиболее законченного представителя абсолютизма короля Людовика XIV и его правительства, которое формировалось из людей незнатного происхождения. Дворянству предоставлялось лишь блистать при пышном дворе Людовика XIV, распроставшись со всеми мечтами о само-

стоятельной политической роли; взамен этого ему предоставлялась «свобода рук» в своих поместьях. Если политическая сторона феодализма была уничтожена, то социальная осталась нетронутой. Опираясь на силы и средства страны, король Людовик XIV повел великодержавную агрессивную политику. Для этого ему предоставляли возможности его способные министры Кольбер, генерал-контролер финансов, военный министр Лувуа, министр иностранных дел Лионн (с которым был близко знаком Константин Гюйгенс-отец), выдающиеся полководцы Тюренн, Кондэ и другие. В особенности большое значение во внутренней жизни Франции имел Кольбер (1619—1683 г.). Происходивший из достаточной купеческой семьи, он выдвинулся еще при жизни кардинала Мазарини, правившего во время малолетства Людовика XIV. Он отличался необычайной работоспособностью.

Кольбер вступил в управление финансами Франции, имея готовую программу деятельности: его целью было уничтожение сохранившихся феодальных привилегий и развитие французской промышленности и торговли при помощи энергичной поддержки со стороны правительственной власти. Однако нельзя сказать, чтобы французскому крестьянину при нем жилось лучше. Государственные налоги и феодальные повинности, а также затраты на войны и блеск двора Людовика ложились тяжелым бременем на плечи народа.

Одной из мер, которую провел Кольбер, было учреждение Французской Академии наук, в деятельности которой он видел средство для получения полезных для народного хозяйства и промышленности открытий и изобретений. В уставе Академии говорилось: «В собраниях никогда не будут говорить о таинствах религии или о государственных делах. Если когда-нибудь придется говорить о метафизике, морали, истории или грамматике, то только мимоходом и лишь поскольку это будет иметь отношение к физике или торговым и промышленным отношениям между людьми». Таким образом, перед Академией были поставлены резко утилитарные задачи.

Академия разделилась на две секции — математики и физики, каждая из которых заседала по разу в неделю, «но поскольку между этими науками существует большая связь, то сочли целесообразным, чтобы члены Академии работали совместно и присутствовали бы все на

заседаниях оба раза в неделю». Математическая секция Академии была хороша по своему составу. В нее входили Гюйгенс, Роберваль, математики Каркави и Френикль, астроном Пикар и физик Мариотт. Что касается секции физики, то там дело было гораздо хуже. Химия была представлена тремя медиками, степень образованности которых в рассматриваемую эпоху хорошо известна каждому читателю комедий Мольера. Так как научной химии еще не существовало, то там экстрагировали, дистиллировали, перегоняли все, что только попадало: один раз целую дыню, другой — сорок живых жаб. Тон задавал ординарный медик короля Дюкло. Он специально занимался явлениями коагуляции (отвердевания). Под эту рубрику подходило все — замерзание воды, образование осадков в жидкости, свертывание молока и крови, исследование различия между яйцами всмятку и крутыми, отвердевание извести и тому подобное. На эту тему в течение восьми месяцев говорились бесконечные речи. На заключительном заседании при подведении итогов Гюйгенс сказал:

«Жидкости характеризуются подвижностью своих частиц, как можно видеть, когда капля вина падает в воду: окрашенные частицы распространяются по всей жидкости. В твердом же теле частицы остаются на месте. Но скорость частиц убывает с уменьшением теплоты. Следовательно, необходимо, чтобы жидкости отвердевали вследствие охлаждения».

Дюкло же заявил:

«Причиной стяжения в жидкостях является, вероятно, сухость; поскольку это качество противоположно влажности, которая делает тела жидкими, то оно, конечно, может произвести противоположное действие, т. е. сделать жидкости твердыми».

Гюйгенс выехал в Париж 21 апреля 1666 года. Четвертого июня он был представлен Кольбером королю. Его поселили в помещении королевской библиотеки, так что он мог посещать заседания Академии, не выходя на улицу. Жалованье, которое он получал (во всяком случае в течение 1666—1675 годов), было больше, чем у какого-либо другого академика — шесть тысяч ливров в год. Старые друзья пропадают. Конрар и Монмор упоми-

наются только один раз: первый в 1673 году при посылке ему «Часов с маятником», а второй (умерший в 1679 году) только в начале пребывания в Париже в 1668 году. Буйо пишет ему (11 апреля 1667 года): «не имея возможности получить честь увидеть Вас лично, что для меня представляет немалое огорчение, и не зная, в каком месте я мог бы Вас встретить, я принужден обратиться к вам письменно». Примерно в таком же духе пишет ему в 1667 году Шаплен, который принимал большое участие в получении Гюйгенсом королевской премии и поступлении его в Академию. Также остаются безответными обращения часовщика Пти, в доме которого жилали Константин-отец и брат Лодевик Гюйгенсы. О них он пишет брату Лодевику (25 мая 1662): «один из них плохой философ, а другой плохой астроном, и поскольку я о них такого мнения (о чем я, однако, не хотел бы, чтобы они знали), то Вы можете судить, какое удовольствие я могу получить из знакомства с ними, которое стоит мне труда и не может быть полезным ни в чем».

Кроме того, у Гюйгенса появляются уже и соперники. Если в пятидесятых годах оптические стекла Гюйгенса были наилучшими в Европе, то теперь итальянцу Кампани удалось сделать нечто лучшее. Гюйгенс пишет 22 июля 1666 года брату Константину:

«Зрительная труба Кампани определенно заслуживает того, чтобы поработать над получением равного ей инструмента... Рассматриваемые в эту трубу предметы совершенно не кажутся голубоватыми и вообще не имеют цветных полос».

Равным образом у Гюйгенса появился соперник и в области астрономии в лице приглашенного в Париж итальянского астронома Джованни Доменико Кассини, который с помощью труб Кампани открыл вращение Юпитера и Марса, а также пятна на Юпитере. Об этом Гюйгенс 18 июня 1666 года пишет брату Константину:

«Открытие вращения Марса конечно очень хорошо и я думаю, что продолжительность периода вращения в 24 часа 40 минут не слишком удаляется от истины, потому что я наблюдал примерно то же самое уже в 1659 году. Причина, по которой я не опуб-

ликовал тогда это открытие, заключалась в том, что в мою трубу я не видел достаточно ясно эти пятна, и я не думаю также, что господа итальянцы видели их гораздо лучше».

Он очень доволен (23 сентября 1667 года), что у брата Константина снова появилась охота заняться оптикой, но, к сожалению, качество имевшегося в их распоряжении материала оставляло желать лучшего. В письме от 14 октября 1667 года он говорит:

«Здесь никогда не было разговоров о приглашении Кампани или Дивини, так как мы думали, что сможем сделать даже лучше, чем они, лишь бы нам доставляли стекло, которое отвечало бы нашим желаниям. Однако придется выписать сюда (в Париж.— *И. В.*) какое-нибудь из их наилучших стекол для объектива, что мне совсем нетрудно будет устроить».

Равным образом не удастся и соперничество с Кассини. Четвертого декабря 1671 года Гюйгенс пишет брату Константину:

«Г. Кассини думал недавно, что открыл новый спутник Сатурна, но, поскольку можно судить... это может быть только какой-нибудь маленькой кометой без хвоста».

Гюйгенс был неправ: это был наиболее удаленный от Сатурна спутник Япет.

В декабре 1672 года Кассини снова наблюдает пропавшего было Япета и открывает еще одного спутника Сатурна — Рею, которого Гюйгенс «сам наблюдал вместе с Пикаром» 11 февраля 1673 года, как бы в опровержение ходивших по Парижу слухов, будто Гюйгенс даже не хотел смотреть на спутников, открытых Кассини.

Брату Лодевигу (28 июля 1673 года) он пишет:

«Г. Кассини... не пропускает ни одной ясной ночи и созерцает небо, мне же никак не хочется заставить себя делать это обязательно; мне довольно и моих старых открытий, которые стоят гораздо больше всех тех, которые он после того сделал (открытие новых спутников Сатурна.— *И. В.*)».

Вообще говоря, деятельность Гюйгенса во время пребывания в Академии была не такой продуктивной, как

прежде. Единственная крупная работа, значение которой может быть даже больше его прежних открытий, было объяснение двойного лучепреломления и связанная с этим волновая теория света. В остальном же это было или завершение прежде начатых работ, или же отдельные частичные исследования, отвечающие на поставленные перед ним вопросы.

К Филиппу Дубле, мужу своей сестры Сюзанны, Гюйгенс 20 января 1668 года пишет:

«Г Кольбер направляет ко мне большую часть этих изобретателей, чтобы я исследовал, приносят ли они что-нибудь хорошее, что бывает очень редко; но, приговаривая к смерти их изобретения, мне все-таки очень хотелось бы быть в состоянии показать что-нибудь лучшее».

Вот Кольбер хочет знать мнение Гюйгенса о проведении в Сен-Жерменский замок воды из новооткрытых источников, как пишет Гюйгенс брату Лодевику 17 октября 1669 года. Бывали занятия и другого рода.

Двадцать седьмого апреля 1668 года Гюйгенс пишет ему же:

«Я только что показывал г. Кольберу опыты с пустотой..., которыми он был очень доволен. Я потерял целое утро за подготовкой всех приборов для демонстрации, а затем все послеобеденное время, показывая эти опыты и обсуждая их с некоторыми из зрителей; среди них наиболее знающим был г: де Шеврез, зять г. Кольбера».

Вообще говоря, Гюйгенс не был доволен работой Парижской Академии. В начале 1670 года он опасно заболел. Посетивший его во время болезни Фрэнсис Вернон, секретарь британского посольства в Париже, пишет Ольденбургу (25 февраля 1670 года), что он посетил тяжело больного Гюйгенса, который передал ему ряд бумаг для Лондонского Королевского Общества. В разговоре с ним Гюйгенс коснулся и работы Академии. Мнение его Вернон передает так:

«...он предвидит распадение этой Академии по той причине, что она была замешана на тинктуре зависти, а также потому, что поддерживают эту Академию исключительно из предположений выгоды, и она всецело

зависит как от настроения государя, так и от благосклонности министра; если кто-нибудь из них изменит свои настроения, то все здание и все предположения этой Академии погибнут».

Действительно, один из хороших знакомых Гюйгенса астроном Озу в результате интриги уже в 1668 году был принужден покинуть Академию, но все же предположения Гюйгенса не оправдались.

В апреле 1670 года, когда Гюйгенсу стало несколько лучше, к нему приезжает брат Лодевик. Он застаёт Гюйгенса лежащим в постели и вычисляющим центр качания креста, подвешенного за один из своих концов (соответствующие вычисления в манускрипте *D* записаны карандашом — единственное место во всех рукописях Гюйгенса, где имеется карандашная запись). В сентябре 1670 года Лодевик отвез его долечиваться в Гаагу, где он пробыл до июня 1671 года.

Когда Гюйгенс возвращается в Париж, то в его лаборатории начинает работать молодой Дени Папен, прославившийся впоследствии как один из изобретателей паровой машины. Первое упоминание о Папене относится к апрелю 1672 года.

Подавая в 1666 году (вероятно Кольберу) программу работ Академии, Гюйгенс ставит между прочим следующие задачи:

«Производить опыт с пустотой при помощи машин и иначе и определить вес воздуха.

Исследовать силу, заключенную в орудийном порохе, заключая его в небольшом количестве в железный или медный ящик достаточной толщины.

Таким же образом исследовать силу воды, разреженной огнем.

Исследовать силу и скорость ветра и употребление, которое можно отсюда сделать для навигации и машин».

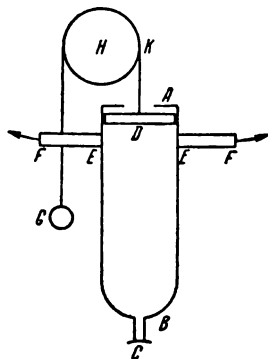
Справедливость требует сказать, что мысль «о разреженной воде» впервые появилась у Гюйгенса в 1660 году, когда в своем дневнике путешествия по Франции он записывает (13 декабря) о посещении Паскаля, с которым говорили о «силе разреженной воды», т. е. пара.

Но если идея о движущей силе пара появилась впервые не у Гюйгенса, то последнему безусловно принадле-

жит первенство в исследованиях (фиг. 33), которые примерно через двести лет привели к изобретению двигателя внутреннего сгорания. Вот как сам Гюйгенс пишет об этом брату Лодевику (22 сентября 1673 года):

«В прошедшие дни я показал господам членам нашей Академии, а затем также г. Кольберу пробу одного изобретения, которое сочли хорошо придуманным и от которого я надеялся бы получить очень большой эффект, если бы был уверен, что оно удастся в больших размерах совершенно так же, как и в малых. Это новая движущая сила, получаемая при помощи пороха и давления воздуха. Вот ее описание.

AB представляет цилиндрическую трубу хорошо скрепленную и имеющую внутри одинаковую ширину. *D* — поршень на верху трубы, который может опуститься внутрь, но не может выйти наружу вследствие имеющихся наверху задержек, которые этому препятствуют. Внизу трубы имеется маленький ящик, который привинчивается к ней; между ними прокладывается кожа, чтобы все щели были закрыты полностью. В точках *E, E* у трубы имеются отверстия, на которые надеваются трубки *F, F* из смоченной кожи. Прежде чем прикрепить ящик *C*, туда кладут немного пороха вместе с немецким фитилем; зажегши конец последнего, ящик закрепляют. Тогда огонь охватывает порох, заполняющий пламенем всю трубу и выгоняющий из нее воздух, выходящий через трубки *F, F*, которые сейчас же закрываются от давления внешнего воздуха и прижимаются к отверстиям *E*, снабженным решеткой для того, чтобы кожаные трубки не вошли во внутрь трубы. Но так как эта труба делается таким образом почти совершенно пустой, то воздух давит с очень большой силой на поршень *D* и заставляет его, опускаясь во внутрь трубы, тянуть веревку *DK* вместе с грузом *G*, или всякой другой вещь, которую к этой веревке подвешивают.



Фиг. 33

Величина этой силы может быть легко вычислена, если только известен вес воздуха над данной поверхностью. Если труба имеет один фут в диаметре, то давление воздуха на этот поршень равно 1 800 фунтам, а на другие поверхности пропорционально их площади. Это, конечно, если предположить, что труба полностью освободится от воздуха, но некоторая его часть всегда остается. Если труба была $2\frac{1}{2}$ дюймов в диаметре и 2 футов вышины, то она освобождалась от воздуха, если взять 5 или 6 гранов пороха, причем в ней оставалась примерно $\frac{1}{6}$ часть воздуха. Если труба имеет 1 фут в диаметре и 4 фута высоты, то на это нужно примерно полторы драхмы пороха, но тогда остается почти половина имевшегося воздуха, что значительно уменьшает эффективность. Но я думаю, что этот недостаток происходит отчасти от того, что выходные отверстия для воздуха слишком малы; это надлежит исследовать в других опытах. Однако, имея трубу с диаметром в один фут, и только на половину пустую, я мог показать удивительное действие и подымать большие грузы и даже людей, тянувших за веревку *HG*. Если бы можно было полностью освободиться от воздуха, то получалось бы совсем по-другому. Поскольку же труба может и не быть особенно крепкой, так как она образует свод против давления внешнего воздуха, а, следовательно, ее можно сделать достаточно легкой, то, пожалуй, не было бы совсем невозможным построить таким образом какую-нибудь машину (я не смею сказать, чтобы летать), но которая по крайней мере подняла бы в воздух себя и того, кто захотел бы ей довериться. Я ожидаю Вашего мнения обо всем этом изобретении; если бы Вы нашли что-нибудь для его улучшения, то Вы сделаете мне удовольствие, сообщив об этом».

Через месяц Гюйгенс еще более поясняет ему свою мысль о возможности применения своего изобретения к воздухоплаванию (27 октября 1673 года).

«Вы же видели... что я считал возможным подняться в воздух не при помощи «легкости» пустоты, но под действием силы движения, приложенного к крыльям или к чему-либо подобному. Во всяком случае я выдвигаю эту мысль лишь чисто теоретически, зная

очень хорошо трудность или даже невозможность ее осуществления».

Действительно, пришлось ждать почти двести лет, пока идея газового двигателя осуществилась на практике. Первый газовый двигатель был построен в 1867 году по тому же самому принципу, но только вместо пороха был применен светильный газ (идея двухтактного газового двигателя). Равным образом оказалось справедливым и второе предвидение Гюйгенса — только после изобретения двигателя внутреннего сгорания стало возможным быстрое развитие авиации в начале текущего столетия.

Лаборант Гюйгенса Папен после двух лет работы сказал Гюйгенсу, что, пожалуй, водяной пар будет более удобным для получения движущей силы. Мы видели, что и эта идея у Гюйгенса уже была (безразлично, додумался ли он до нее сам или получил от Паскаля); таким образом, Гюйгенс стоит первым в ряду исследователей, идущих по пути развития теплоэнергетики.

ХII

Семидесятые годы были тяжелой эпохой в жизни Гюйгенса. Прежде всего разразилась беда над его родиной. В 1672 году войска Людовика XIV вторглись в Голландию, не встречая почти никакого сопротивления. Правители Голландии были в ужасе и предлагали Людовику XIV любую контрибуцию и даже шли на территориальные уступки. Но Людовик хотел большего. Он поставил такие условия, которые низводили Голландию на положение слабого вассала французского короля. Все это тяжело переживал Гюйгенс, смотревший очень пессимистически и на положение родины, да и на свое собственное в Париже, в столице вражеского государства. Правда, и те и другие опасения оказались не вполне обоснованными. Война, скоро переросшая в общеевропейскую, окончилась для Голландии счастливо (за все расплатилась Испания). Самому же Гюйгенсу во Франции исправно платили академическое жалованье. Были у Гюйгенса неприятности и в научной области: его мучила невозможность привести свои исследования в законченный и пригодный для печати вид, приходилось переживать, что уже найденные им результаты публикуются

другими учеными, получившими их независимо от Гюйгенса. Правда, положение с публикацией его работ улучшается с выходом в свет в 1673 году капитального произведения Гюйгенса «Часы с маятником», но и эту книгу приходится посвящать врагу его родины, французскому королю Людовику XIV, а в Англии она вызывает целую бурю упреков за то, что Гюйгенс не уважает английского приоритета в целом ряде научных открытий. В особенности жестокий спор разгорелся у Гюйгенса с Гуком после того, как в 1675 году Гюйгенс сделал еще важное изобретение, а именно сконструировал часы со спиральной пружиной и балансиrom, которые являются прототипом всех современных карманных часов, а также точных хронометров, вполне пригодных для определения долгот на море. Спор с Гуком из-за приоритета достиг такой остроты, что, когда в 1678 году Гук был избран на пост ученого секретаря Королевского Общества, Гюйгенс фактически прекратил переписку с Обществом.

В это время основное внимание Гюйгенса привлекают световые явления.

Интенсивные занятия физической оптикой начинаются скоро после приезда заболевшего Гюйгенса в 1676 году в Голландию, где он решил задержаться возможно более. Брату своему Константину он пишет (5 июня 1677 года):

«У меня пока еще нет желания во Францию возвращаться, но я не хочу также и совершенно от него отказаться, так как неизвестно, что может случиться и мне, пожалуй, придется изменить свои планы; поэтому в письмах к этим господам я всегда выставляю в качестве предлога свою болезнь, хотя, слава богу, я чувствую себя достаточно хорошо».

В Голландии Гюйгенс познакомился со знаменитым микроскопистом Левенгуком, к открытиям которого в Париже он относился скептически, считая их простым обманом зрения, в Голландии же начал сильно ими интересоваться и даже сам занялся изготовлением микроскопа.

В то же самое время Гюйгенс получил известие об определении величины скорости света датским астрономом Олафом Рёмером (1644—1710), ставшим членом Парижской Академии с 1672 года. Доклад Рёмера об опре-

делении скорости света при помощи наблюдения спутников Юпитера был сделан на заседании 22 ноября 1676 года и вызвал споры. Основным противником Рёмера был астроном Кассини, работавший над теорией движения спутников Юпитера. Гюйгенс письменно стал на защиту Рёмера. О своих дальнейших открытиях Гюйгенс пишет:

«6 августа 1677 «эврика» («Я нашел» — известное изречение Архимеда) причину удивительного преломления света в исландском кристалле.
В Париже 6 августа 1679 «эврика» подтверждение моей теории о свете и преломлениях».

Изложение хронологической последовательности открытий требует начать с определения величины скорости света. Конечно, в работе, посвященной Гюйгенсу, не является вполне уместным изложение способа Рёмера, но это и не потребуется, так как мы вполне можем ограничиться рассказом о работах на эту тему самого Гюйгенса.

Первого ноября 1677 года Рёмер пишет ему:

«Ты упоминаешь о рассуждении Декарта, из которого заключаешь, что свет обладает настолько большой скоростью, что не требует более 10 секунд для прохождения расстояния равного 30 диаметрам Земли. Это, конечно, немало меня удивляет, так как я никогда не видал у Декарта чего-нибудь на эту тему, если не считать какого-то письма, приведенного и достаточно остро осмеянного отцом Парди в небольшом трактате о движении, да и там дело шло не о 10 секундах, а о половине часа. Возможно, что все это рассуждение принадлежит тебе, и Декарту ты обязан одним лишь указанием... Я очень хочу знать, каким образом ты получил оттуда эти 10 секунд».

Гюйгенс отвечает (18 ноября 1677 года):

«Что касается написанного мной о рассуждении Декарта, то дело действительно обстоит именно так, как ты угадал. Я обязан ему лишь указанием, а весь этот предмет я рассмотрел совершенно иначе, чем он...

...Сущность моих расчетов заключается в следующем. Пусть A будет Солнце, неподвижное согласно гипотезе Коперника, а BD — орбита годового движения Земли; пусть последняя находится в точке B .

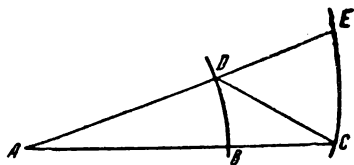
Орбита Луны пусть будет CE , а ABC — прямая, пересекающая в C лунную орбиту. Если распространение света требует времени, то предположим, что для прохождения длины BC нужен один час. Следовательно, при нахождении Земли в B ее тень, или прерыв солнечного света, достигнет точки C только через один час. Тогда через час после того времени, когда Земля была в B , Луна, придя в C , претерпевает затемнение, но для земного наблюдателя затемнение это будет замечено только через второй час, иными словами, через два часа после того, как Земля была в B . Предположим, что за эти два часа Земля перешла в D . Тогда наблюдающий отсюда увидит Луну затмевающейся в точке C , из которой она уже час тому назад ушла, и одновременно увидит Солнце в A , ибо, поскольку оно неподвижно и свет распространяется по прямым линиям, оно необходимо должно всегда наблюдаться в том самом месте, где оно действительно и находится. Следовательно, CDE будет угол, на который прямо противоположная Солнцу точка обгоняет место наблюденного затмения; он будет равен вместе взятым углам DCB и DAB . В данном случае я получаю, что угол CDE будет равен приблизительно 33 градусам. Действительно, я полагаю, как в моей «Сатурновой системе», расстояние AB до Солнца равным приблизительно 12 000 диаметров Земли; таким образом, это расстояние будет 400 раз содержать расстояние BC до Луны, которое равно 30 таким же диаметрам. Поэтому угол DCB будет равняться 400 углам DAB . Но угол DAB , соответствующий перемещению Земли за 2 часа, равен 5 минутам; следовательно, DCB равен приблизительно 33 градусам, а CDE превышает его только на 5 минут. Конечно, если переход света от нас к Луне будет занимать не один час, а всего только одну минуту, то угол будет равен 33 минутам.

Наконец, если мы уделим на этот переход света всего только 10 секунд, то угол DCB будет только $5\frac{1}{2}$ минут. Можно думать, что если бы этот угол имел такую именно величину, то его когда-нибудь астрономы обязательно бы заметили. Таким образом я заключил, что он, конечно, не может быть больше, а следовательно, и опоздание света при движении от

Луны к Земле не может быть более 10 секунд времени.

Таким именно было мое рассуждение, которое без сомнения согласно с твоим, ибо ясно, что из него может быть получена твоя замечательная теорема» (фиг. 34).

В 1678 году Гюйгенс приезжает в Париж, где его микроскопы произвели фурор. 30 июля 1678 года он продемонстрировал их на заседании Парижской Академии, затем отдельно показал Кольберу и его родственникам. Находившийся в это время во Франции известный английский философ Джон Локк пишет 6 августа 1678 года:



Фиг. 34

«Я получил из Парижа известие от моего тамошнего знакомого... Он упомянул мне о необычайно хороших качествах микроскопа, который г. Гюйгенс привез с собой из Голландии».

Всю вторую половину 1678 года Гюйгенс ведет оживленную переписку со старшим братом Константином по поводу улучшения конструкции микроскопа. В первой половине 1679 года он опять болен (это его третья болезнь, перенесенная во Франции). По выздоровлении он снова начинает заниматься физической оптикой. Лейбницу он пишет (22 ноября 1679 года):

«Все последнее лето я много работал над моими преломлениями, в особенности над тем, что касается исландского кристалла¹: последний представляет настолько странные явления, что причину всех их я еще не постиг. Но то, что я нашел, очень хорошо подтверждает мою теорию света и обычных преломлений».

«Трактат о свете» сильно отличается от предшествующих произведений Гюйгенса. Он написан не по-латыни, а по-французски и, кроме того, не содержит такого пунктуального разделения на «предложения» как в других его научных произведениях. «Я написал его довольно небрежно», пишет Гюйгенс в предисловии, «и намере-

¹ Дело идет о двойном лучепреломлении в кристалле исландского шпата.

вался перевести его на латинский язык... Но когда удовольствие от новизны прошло, то я откладывал выполнение своего намерения и не знаю, когда я мог бы закончить его, так как меня часто отвлекали или дела, или какие-нибудь новые занятия. В таком положении дела я, наконец, решил, что лучше будет опубликовать это произведение как оно есть, чем рисковать его утратой, если ждать еще больше».

Гюйгенс рассматривает свет прежде всего как движение. «Нельзя сомневаться, пишет он, что свет представляет движение некоторой материи». На это указывает разрушение тел в фокусе зажигательного стекла, действующие на нерв зрительные впечатления, обусловленные тем, что «между ними и светящимся телом находится некоторая материя». Световые колебания объясняются упругостью частичек эфира. Последние не должны необходимо иметь сферическую форму, но обязательно должны быть одинаковыми; в противном случае по законам теории удара испытывающие удар частички не могли бы остановиться, а получили бы движение вперед и назад. Гюйгенс вспоминает известный из теории удара факт, что когда шарик налетает с некоторой скоростью на другой покоящийся, обладающий одинаковой с первым массой, то он останавливается, а ударенный получает скорость ударившего шарика. Затем он указывает, что два шарика могут обмениваться своими скоростями даже и в том случае, когда они непосредственно не соприкасаются, а именно через посредство промежуточных шариков. Этот взаимный обмен скоростями объясняет, по Гюйгенсу, возможность одновременного распространения через одну и ту же область нескольких различных световых лучей.

После этого формулируется знаменитый принцип Гюйгенса:

«При испускании световых волн следует иметь в виду, что каждая частичка материи, в которой распространяется волна, не должна сообщать свое движение только ближайшей частичке, находящейся на одной прямой с первой частичкой и источником света; она также необходимо сообщает его всем частичкам, которые соприкасаются с ней и препятствуют ее дви-

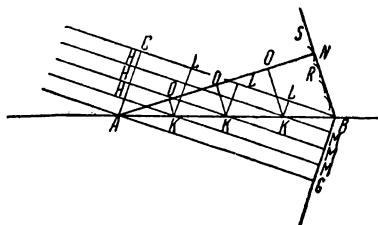
жению. Таким образом, необходимо, чтобы вокруг каждой частички зарождалась волна, центр которой был бы в этой частичке».

Если из центра лучеиспускания провести два каких-нибудь луча, то световая волна будет распространяться в угле, заключенном между этими лучами.

«Хотя отдельные волны, производимые частичками, находящимися в этом угле, будут распространяться и за его пределами, но все-таки, подходя в один и тот же момент к какой-нибудь точке, они могут образовать общую волну только в пределах между этими лучами; эта волна, завершающая их движение, будет касаться всех таких частных волн и иметь свой центр в той точке, из которой распространяется свет... те же части отдельных волн, которые распространяются вне пределов этого угла, будут слишком слабыми, чтобы произвести там свет».

Затем Гюйгенс объясняет при помощи своей волновой теории, каким образом происходит отражение света (фиг. 35):

«Пусть AB будет плоская и полированная поверхность некоторого тела (металла или стекла), которую мы сначала будем рассматривать как сплошную... пусть прямая AC , образующая с AB некоторый угол, представляет часть световой волны, центр которой находится так далеко, что эту часть мы можем рассматривать как прямую линию...



Фиг. 35

...Место C волны AC в некоторый промежуток времени продвинется в точку B на плоскости AB , следуя по прямой CB , которую мы должны рассматривать как вышедшую из испускающего свет центра и, следовательно, перпендикулярную к AC . В этот же самый промежуток времени место A той же волны, распространение которой было задержано плоскостью AB ..., должно продолжать свое движение в мате-

рии, которая находится выше плоскости AB , причем оно переместится на расстояние равное CB и образует свою частичную сферическую волну, как мы сказали выше: эта волна изобразится окружностью SNR , центр которой будет в A , а радиус $AN=CB$. Если мы в дальнейшем будем рассматривать другие места H волны AC , то ясно, что они не только дойдут до поверхности AB по прямым NK параллельными CB , но, кроме того образуют из центров K частичные сферические волны, изображаемые здесь окружностями, радиусы которых будут соответственно равны KM , иными словами, продолжениями линий NK до прямой BG параллельной AC .

Все эти окружности будут иметь в качестве общей касательной прямую BN , а именно ту самую, которая касалась первой из этих окружностей, имевшей центр A и радиус AN равный BC . Таким образом эта прямая BN (в части заключенной между B и N — основанием перпендикуляра из точки A) будет как бы образована всеми этими окружностями; она и будет заканчивать движение, получившееся вследствие отражения волны AC ... Поэтому BN можно рассматривать как дальнейшее положение волны AC в тот момент, когда место C придет в B . Последовательные положения этой волны мы получим, опустив из точек K перпендикуляры KO параллельные BN , а также проведя параллельные AC прямые KL . Таким образом станет ясно, как волна AC из прямой превратилась последовательно в ломаные линии OKL и, наконец, снова стала прямой, придя в BN ».

После этого Гюйгенс доказывает, что угол падения будет равен углу отражения (из равенства треугольников ABC и BNA).

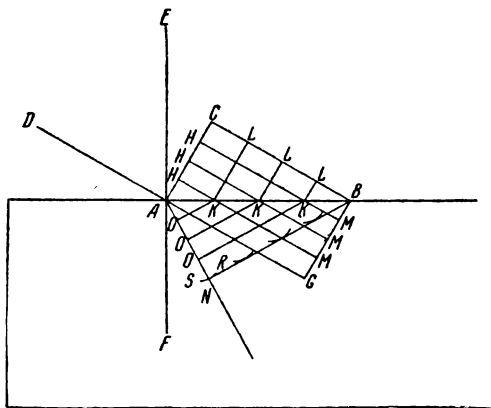
Далее идет объяснение преломления света с точки зрения волновой теории. Так как в начале книги, говоря об открытии Рёмера, Гюйгенс указал, что скорость света (вопреки мнению Декарта) имеет конечную величину, то различие этой скорости в разных прозрачных телах он считает основной причиной преломления.

«Можно думать (пишет он), что распространение света должно совершаться медленнее внутри тел, чем

в эфире... Я покажу, что в этом различии скоростей и состоит причина преломления».

Описав сущность этого явления и сформулировав основной закон постоянства отношения синусов угла падения и преломления на границе двух определенных прозрачных сред (фиг. 36), Гюйгенс пишет:

«Пусть прямая AB изображает плоскую поверхность, разделяющую два прозрачных тела, расположенных с двух различных сторон C и N ... Пусть ли-



Фиг. 36

ния AC представляет часть световой волны..., эту линию мы можем рассматривать как прямую. Итак, место C волны AC в некоторый промежуток времени дойдет до плоскости AB , следуя по прямой CB , которую мы должны рассматривать как выходящую из испускающего свет центра и, следовательно, пересекающую AC под прямым углом. В то же самое время место A достигло бы G , следуя прямой AG , равной и параллельной CB , и вся часть волны AC оказалась бы в GB , если бы вещество прозрачного тела передавало движение волны так же быстро, как и эфир. Но мы предположим, что оно передает это движение более медленно, например, на одну треть.

Тогда в прозрачном теле движение от точки A распространится на расстояние, равное двум третям CB . и образует, как было сказано выше, свою особую сфе-

рическую волну. Последняя изобразится окружностью SNR , центр которой будет A , а радиус равен двум третям CB . Если затем мы рассмотрим другие места H волны AC , то будет ясно, что в то время, когда место C придет в B , они, следуя прямым NK параллельным CB , не только дойдут до поверхности AB , но, кроме того, из центров K породят свои особые волны в прозрачной среде, которые мы можем изобразить здесь окружностями с радиусами равными двум третям линий MK — продолжений NK до прямой BG ...

Все эти окружности будут иметь в качестве общей касательной прямую BN , ту самую, которая была проведена из точки B в качестве касательной к первой окружности SNR ...

Вот эта прямая BN , как бы образованная малыми дугами этих окружностей, является границей движения, какое волна AC сообщила внутри прозрачного тела... Таким образом эта линия представит положение движущейся волны AC в тот момент, когда ее место C достигнет B . Если мы хотим знать, как волна AC последовательно переходила в BN , то достаточно будет только провести на том же самом чертеже прямые KO параллельные BN , а также KL параллельные AC . Таким образом, мы увидим, как волна AC из прямой сделалась ломаной последовательно во всех положениях LKO и как она снова сделалась в BN прямой.

...Если мы проведем перпендикуляр EAF к плоскости в точке A и AD перпендикулярно к волне AC , то DA изобразит луч падающего света, а AN , перпендикулярная к BN , представит луч преломленного, так как эти лучи представляют не что иное, как прямые, по которым распространяются части волн.

Отсюда легко получить основной закон преломления, а именно, что синус угла DAE будет всегда иметь то же самое отношение к синусу NAF независимо от наклона луча DA и что это отношение будет равно отношению скорости волн в прозрачной среде со стороны AE к их скорости в прозрачной среде со стороны AF . Действительно, если рассматривать AB как радиус некоторой окружности, то синус угла BAC будет BC , а синус угла ABN будет AN . Но угол BAC равен DAE , ибо каждый из них вместе с CAE дает пря-

мой угол. А угол ABN равен NAF , так как каждый из них вместе с BAN дает прямой угол. Следовательно, синус угла DAE так относится к синусу NAF как BC к AN . Но отношение BC к AN было тем же самым, что отношение скорости света в среде AE к скорости света в среде AF ; следовательно, синус DAE будет относиться к синусу NAF как вышеупомянутые скорости света».

Вслед за этим Гюйгенс рассматривает полное внутреннее отражение света и дает свое доказательство принципа Ферма, а именно, что при указанном соотношении между углами падения и преломления время, затраченное светом для того, чтобы пройти вместе взятые прямые DA и AN , будет наименьшим.

Глава пятая посвящена рассмотрению двойного лучепреломления в исландском шпате. Для того чтобы этот вопрос был более ясным для читателя, полезно будет сопоставить то, что знал о свете Гюйгенс, с теми сведениями, которыми в настоящее время обладаем мы.

Как видно из предыдущего, Гюйгенс гораздо больше интересовался волнами — распространением колебаний в прозрачной среде, механизм самих колебаний не представлялся ему ясным: это достаточно хорошо можно видеть из устанавливаемых им аналогий с теорией удара упругих шаров.

В настоящее время мы знаем, что колебательные процессы бывают двоякого рода. В *продольных* колебаниях (какими, например, являются звуковые) движение частиц взад и вперед совершается по той же прямой, по которой совершается распространение волны. Последняя состоит из последовательно распространяющихся сгущений и разрежений. В *поперечных* колебаниях (какими, например, являются волны от брошенного на поверхности спокойной воды камня) движения совершаются по прямой перпендикулярной к направлению (лучу), по которому распространяются волны. Если через этот луч и какое-нибудь положение колеблющейся частицы мы проведем плоскость, то все время движения волны колеблющаяся частица будет оставаться в этой плоскости. Так в волнах на поверхности воды от брошенного камня частички воды движутся вверх и вниз, а распространение возмущения происходит по горизонтальным прямым — радиусам круговых волн.

Так как через одну и ту же прямую можно провести множество плоскостей, то в поперечных колебаниях частицы могут колебаться в каждой из этих плоскостей — так называемых плоскостях колебаний. Световые колебания представляют как раз колебания поперечные. Если выделить нормальный луч света, то составляющие его колебания происходят во всех плоскостях, которые можно провести через линию луча.

В этом случае мы имеем так называемый *неполяризованный* свет. Можно, однако, сделать так, чтобы колебания всех частиц в луче света происходили в одной плоскости. В этом случае мы будем иметь так называемый *поляризованный* свет. Поляризация света происходит при прохождении его через кристалл исландского шпата. Световой луч в кристалле распадается на два луча, колебания в которых совершаются во взаимно перпендикулярных плоскостях. Для одного из таких лучей соблюдаются законы обычного преломления (обыкновенный луч), для другого же нет (необыкновенный луч). По этому поводу Гюйгенс пишет:

«Так как имели место два различных преломления, то я пришел к заключению, что также имелось две различные эманации световых волн... одной из них я приписал наблюдавшееся в этом камне правильное преломление, предполагая, что для этой эманации волны имеют обычную сферическую форму...

Что касается другой эманации, которая должна была произвести неправильное преломление, то я захотел попытаться, что могут произвести эллиптические, или лучше сказать сфероидальные волны...».

Такого рода сфероидальные волны (в виде эллипсоида вращения) предполагают, что скорость распространения света в кристалле не будет одинаковой во всех направлениях, причем она не будет одинаковой и для обоих лучей.

«Так как мы имеем... два различных закона распространения света в этом кристалле, то кажется, что только в направлениях перпендикулярных к оси сфероида (который предполагается сплюснутым.— *И. В.*) один луч движется быстрее, чем другой, но что оба луча движутся с одинаковой скоростью в других направлениях, а именно параллельных оси сфероида,

которая будет одновременно осью тупого угла кристалла (так Гюйгенс называл прямую, составляющую равные углы с ребрами трехгранного угла кристалла, все плоские углы которого являются тупыми.—И. В.)».

Это построение Гюйгенса целиком перешло в современную физическую оптику. Если в области механики в восемнадцатом веке победа осталась за Ньютоном, то в девятнадцатом веке в физике Гюйгенс взял реванш. Оказалось отброшенным Ньютоново действие на расстояние, а введенное Гюйгенсом понятие об эфире стало основным для объяснения не только световых, но и электромагнитных явлений.

ХIII

Осенью 1681 года заболевшего Гюйгенса увезли из Парижа на родину в Гаагу. Он не думал, что видит Францию в последний раз. У Гюйгенса к Франции вообще и к Академии, в частности, были несколько двойственные отношения. С одной стороны, он безусловно тяготился той ролью, которую ему приходилось играть во Франции, но с другой — не был вполне уверен в прочности положения своих близких в Голландии, где еще шла борьба купеческой аристократии с партией Вильгельма Оранского, ближайшим сотрудником которого был старший брат Христиана Константин Гюйгенс. Однако удержаться во Франции Гюйгенсу не удалось. В сентябре 1683 года умер покровитель Гюйгенса, французский министр Кольбер, инициативе которого Парижская Академия была обязана своим существованием. Затем с 1681 года шла новая война с Францией, вызванная присоединением Людовиком XIV Страсбурга. В числе участников антифранцузской коалиции была и Голландия, штатгальтер которой Вильгельм Оранский был яростным противником Людовика XIV, а о близости Гюйгенсов к Вильгельму во Франции хорошо знали. Наконец, в 1685 году Людовик XIV отменил Нантский эдикт, предоставлявший французским протестантам свободу вероисповедания, и во Франции начались религиозные преследования. Это обстоятельство сделало невозможным пребывание в Академии Гюйгенса, который формально принадлежал к протестантам. В 1687 году умирает девяностолетний отец Гюйгенса Константин Гюйгенс, а в 1688 году

старший брат уезжает в Англию вместе с Вильгельмом III Оранским, который после изгнания Стюартов становится английским королем. Гюйгенс остается на родине одиноким. В 1690 году он заканчивает работу над печатанием «Трактата о свете». Ухудшившееся состояние здоровья не позволяет Гюйгенсу интенсивно заниматься научной работой. Он умер 8 июля 1695 года. Последним его сочинением, посвященным брату Константину — товарищу по занятиям оптикой и астрономией, было «Космотеорос» (Созерцатель мира) — полунаучное, полуфилософское произведение, посвященное разбору вопроса о возможности существования жизни на других планетах (Гюйгенс решает этот вопрос в утвердительном смысле).

Особенно много внимания Гюйгенс уделил рассмотрению того, как могут представляться движения других планет жителям какой-нибудь одной из них. Самая последняя запись в его рукописях относится к вычислениям максимальных элонгаций от Солнца для Меркурия при наблюдениях с Венеры, Земли при наблюдениях с Марса, и, наконец, Марса и Юпитера при наблюдениях с Юпитера и соответственно с Сатурна. После этой записи, относящейся к концу 1694 или началу 1695 года, в манускрипте идут только чистые листы.

Ко времени работы над «Космотеоросом» относится интересная попытка Гюйгенса определить расстояние до неподвижных звезд. Об этой попытке он пишет так:

«Я попробовал, каким образом я так смогу уменьшить диаметр Солнца, чтобы оно посылало в наш глаз не больше света чем Сириус... Для этого я закрыл одно из отверстий двенадцатифутовой трубы тончайшей пластинкой, в середине которой сделал отверстие, не превышавшее двенадцатой части линии или 144-й части дюйма. Эту часть трубы я направил на Солнце, а другую придвинул к глазу, который таким образом видел частицу Солнца, диаметр которой относился к диаметру Солнца как 1 к 182. Но эта частичка, как я нашел, была гораздо ярче чем наблюдаемый ночью Сириус. Видя таким образом, что мне еще нужно гораздо больше уменьшить диаметр Солнца, я вставил перед отверстием этой пластинки мельчайший стеклянный шарик, диаметр которого приблизительно равнялся первоначальному диаметру отверстия (этим

шариком я пользовался ранее для микроскопических наблюдений). Наблюдая таким образом в трубу Солнце и закрыв со всех сторон голову, чтобы не мешал дневной свет, я установил, что видимая его яркость была приблизительно такой же как у Сириуса. Затем, произведя вычисления по законам Диоптрики, я получил, что наблюденный таким образом диаметр Солнца был в 152 раза меньше той частички, которую я наблюдал через небольшое отверстие. Если перемножить $1/152$ на $1/182$, то получится $1/27664$. Следовательно, если сжать так Солнце, или же на столько удалить его (ибо в обоих случаях действие будет одно и то же), что его диаметр будет равен $1/27664$ части того, который мы наблюдаем на небе, то у него останется света не больше чем у Сириуса. Но расстояние удаленного таким образом Солнца необходимо будет относиться к действительному его расстоянию как 27664 к 1... Следовательно, если мы положим Сириус одинаковым с Солнцем..., то его расстояние будет относиться к расстоянию Солнца как 27664 к единице».

Считая среднее расстояние Солнца равным 150 миллионам километров и скорость света равной 300 тысячам километров в секунду, мы получим, что на прохождение от Солнца до Земли свет тратит $8\frac{1}{3}$ минуты. Если мы округлим 27664 до 30 тысяч и будем считать год равным 360 дням, то расстояние Сириуса до нас окажется равным:

$$\frac{8\frac{1}{3} \cdot 30\,000}{60 \cdot 24 \cdot 360} = \frac{1}{2} \text{ светового года.}$$

В действительности расстояние Сириуса составляет около 8 световых лет.

«Космотеорос» Гюйгенса вышел из печати в 1698 году уже после смерти не только Христиана, но и Константина Гюйгенса, которому Христиан завещал окончание работы над печатанием этой книги. Книга была переведена на русский язык и издана два раза — в 1717 и 1721 годах.

Имя «славного Гугения» было хорошо известно Петру I, распорядившемуся относительно перевода на русский язык «Космотеороса». Перевод был выполнен и напечатан. Его экземпляры представляют теперь библиографическую редкость, потому что после смерти Петра I церковники украдкой растащили большую часть напечатанных экземпляров.

Мы можем составить себе представление о том, какими путями идеи Гюйгенса впервые проникли в Петербургскую Академию. В 1703 году пленный мариенбургский пастор Глюк (служанкой которого была позднейшая императрица Екатерина I) с разрешения царя Петра I завел в Москве школу, в которой преподавал картезианскую философию, новые и древние языки и т. д.; школа не существовала особенно долго (Глюк скоро умер), а его преемник Паузе, по-видимому, не имел большого успеха, но питомцами этой школы были Лаврентий Блюментрост, лейб-медик Петра I и первый президент Академии, а из русских — петровские дипломаты братья Веселовские, дьяк Иван Грамотин и другие. Паузе, последние годы жизни которого прошли в Академии, где он работал в качестве переводчика (умер в 1735 году), был как раз тем лицом, кто перевел «Cosmotheoros» Гюйгенса под названием «Книга мирозрения».

Не нужно также забывать, что впервые русские академики Германн, Даниил и Николай Бернулли (сыновья Ивана Бернулли) и, наконец, сам Эйлер были связаны с Гюйгенсом через Лейбница, который прямо называл себя «учеником Гюйгенса» и через обоих братьев Якова и Ивана Бернулли, бывших во многих отношениях продолжателями Гюйгенса, так что естественно, что физические воззрения первого периода деятельности С.-Петербургской академии в известной степени были связаны с физическими представлениями Гюйгенса.



Оглавление

Глава I	3
Глава II	6
Глава III	9
Глава IV	15
Глава V	25
Глава VI	31
Глава VII	49
Глава VIII	58
Глава IX	67
Глава X	75
Глава XI	86
Глава XII	95
Глава XIII	107

Иван Николаевич Веселовский
ХРИСТИАН ГЮЙГЕНС

Редактор *Т. В. Михалкевич*
Художник *В. Я. Батищев*
Художественный редактор *В. И. Бельский*
Технический редактор *В. И. Корнеева*
Корректор *Т. Н. Смирнова*

Сдано в набор 10/VII 1959 г. Подписано к печати
28/X 1959 г. А 010116, 84×108¹/₃₂. Печ. л. 7(5,74)+
+вкл. 0,12(0,1). Уч.-изд. л. 5,48+вкл. 0,04,
Тираж 12 тыс. экз. Цена 1 руб. 40 коп.

Учпедгиз. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.
Заказ 357
Полиграфкомбинат им. Я. Коласа,
Минск, Красная, 23.