

«стремление» («маил» или «склонность»), которое и поддерживает его движение. Этих «стремлений» у тела три: *психическое*, *естественное* (у свободно падающего тела) и *насильственное* (или приложенная сила). Действие «стремления» зависит от величины веса тела. Если приложенная сила действует в пустоте, то движение должно сохраняться, не уничтожаясь и не прерываясь.

Взгляды Ибн Сины получили развитие в трудах его последователей — ал-Багдади и испано-арабских ученых. Не останавливаясь на деталях их концепций движения, заметим, что комментарии Ибн Рушда, Ибн Баджжи, Ибн Туфайля, ал-Багдади к трудам Аристотеля, Филопона, Ибн Сины сыграли важную роль в создании средневековыми европейскими учеными теории импетуса, во введении и изучении характеристик неравномерного движения.

1.3. Теория движения тел в философии номиналистов

Проблема движения тел (выяснение его причин и свойств) всегда была одной из основных в учениях греческих, арабских и европейских философов. Концепции Платона и его ученика Аристотеля, Филопона, Ибн Сины, отличаясь одна от другой во многих деталях, все носили умозрительный, оправдательный характер. Каждый мудрец пытался найти ответ на вопрос «почему движется тело?». Безрезультатность, неудовлетворительность попыток ответа на этот вопрос подтверждалась тем, что новые поколения ученых искали все новые и новые объяснения. Но поиск первопричины движения был и оставался обреченным на неуспех.

Более продуктивным оказался поиск ответа на вопрос «как движется тело?». Этот вопрос так или иначе присутствовал во всех философских концепциях движения, но от Аристотеля до Галилея он постепенно превратился в главный вопрос научного естествознания и техники, одновременно приняв не только качественное, философское, но и количественное, математическое выражение.

После Филопона и арабских ученых проблема движения брошенного тела начинает обсуждаться и в христианской Европе. «Ангельский доктор» Фома (Томас) Аквинский в своих комментариях к Аристотелю возражает против возможности передачи телу некоторой мощи

и поддерживает аристотелеву идею о давлении воздуха. Позднее свою точку зрения на причины и свойства движения выразили профессора Оксфордского и Парижского университетов, ставших в начале XIV в. центрами исследования проблем механики.

Видным французским математиком и механиком XIII в. был Иордан Неморарий. Его математические трактаты «Арифметика, изложенная в 10 книгах», «О данных числах», «О треугольниках», «Трактат о сфере» свидетельствуют о широте интересов, хорошем знании трудов предшественников и характеризуют состояние математического знания той эпохи. Это относится и к механическим сочинениям Неморария «О тяжестих», «Элементы доказательств, касающихся тяжестей», «Книга о пропорции тяжестей».

В них автор повторяет и развивает идеи Аристотеля, древнегреческих и арабских ученых средневековья: обобщает учение о рычаге, вводя понятие «тяжести соответственно положению»; решает задачу о равновесии тела на наклонной плоскости; продолжая идеологию кинематической статики, предлагает теорию равновесия простых машин, основанную на сравнении относительной тяжести грузов при их перемещении. «Один и тот же груз, — рассуждал Неморарий, — приложенный в разных точках, оказывает разное действие на механизм (рычаг, ворот, наклонную плоскость, ...)». Например, груз на более длинном плече рычага более тяжел, как и груз на более крутой наклонной плоскости.

Понятие «тяжести соответственно положению», аналогичное «силе движения» Сабита ибн Корры, и условие равновесия тел являются важными звеньями в формировании понятия «момент силы» («статический момент») и принципа возможных перемещений («золотое правило механики»). Трактаты И. Неморария были широко известны в XIII–XV вв. в европейских странах и наложили отпечаток на творчество его многочисленных последователей не только во Франции, но и в Англии, Голландии, Италии.

Первым европейским трактатом по кинематике принято считать сочинение Герарда Брюссельского «О движении» (конец XII – начало XIII вв.). Заметим, что движение здесь рассматривается с традиционно аристотелевых позиций и часто ассоциируется со скоростью. Книга Герарда посвящена исследованию соотношений между движениями точек, линий, плоских и пространственных тел. Следуя Архимеду («Послание о методе»), Герард рассматривает линию как совокупность

точек, поверхность — как совокупность линий, тело — как совокупность поверхностей. Для сравнения линий двух фигур автор вводит принцип соответствия между множествами точек¹.

Рассматривая круговые движения точек и вращательные движения тел, Герард делает вывод о том, что прямая, параллельная оси вращения, движется «одинаково с любой своей точкой», а радиус, вращаясь, «движется одинаково со своей серединой». В этом можно усмотреть идею определения средней скорости движения тела. В трактате различаются *равномерные* и *неравномерные* движения тел в пространстве. При сравнении перемещений тел всегда имеются в виду равные промежутки времени. Утверждается, что скорости (пути, описываемые точками вращающегося радиуса) меняются от нулевой (начало радиуса) до максимальной (конец радиуса).

Исследования Герарда Брюссельского продолжили английские схоласты-номиналисты Роджер Бэкон, Дунс Скотт, Уильям Оккам, Томас Брадвардин² и его последователи. В «Трактате о пропорциях или о пропорциях скоростей при движении» (1328) основоположник Оксфордской школы «калькуляторов» — Т.Брадвардин — выражает сомнение в правильности аристотелевой оценки величины скорости тела в зависимости от действующих сил. Пользуясь своей теорией пропорций, описанной в первой главе трактата, Брадвардин записывает словесную формулу аристотелевой физики в виде $v = \frac{F}{R}$, где v — скорость, F — движущая сила, R — сопротивление движению. По Аристотелю получалось, что при $F = R$, $v = 1$, но по логике должно быть $v = 0$. Это несоответствие подтолкнуло Брадвардина к поиску своей пропорции и он предлагает считать, что $v \sim F - R$ или $v = \frac{F - R}{R}$.

По Аристотелю, при постоянном сопротивлении должно быть:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{F_1}{F_2},$$

а при постоянной F —

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

¹К этому можно относиться как к предыстории формирования математического понятия функции.

²Математик, механик, богослов. Профессор, прокурор Оксфордского университета. С 1333 г. — канцлер собора св. Павла в Лондоне, архиепископ.

В этом, однако, Бравдвардин усматривает противоречие и предлагает свою пропорцию. Получается, что любая, сколь угодно малая сила F может двигать любое, сколь угодно большое тело, но со скоростью, меньшей в $\frac{R_1}{R_2}$ раз. В таком случае закон Аристотеля можно представить равенством

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{F_1}{R_1}}{\frac{F_2}{R_2}}.$$

Аристотелев закон изменения скорости

$$nv = n \frac{F}{R}$$

Бравдвардин модернизирует весьма сложным образом:

$$nv \sim \left(\frac{F}{R} \right)^n.$$

Удвоение скорости соответствует возведению $\frac{F}{R}$ в квадрат, утроение — в куб и так далее. Записав пропорцию в виде функционального уравнения

$$nv(x) = v(x)^n,$$

где $x = \frac{F}{R}$, получаем его решение — выражение для скорости в зависимости от действующих сил —

$$v = \log x = \log \frac{F}{R},$$

при $F = R$, дающее $v = 0$.

С физической точки зрения, гипотеза Бравдвардина о соотношении скорости и действующих сил необоснованна. Но чрезвычайно важно, что впервые привлекается идея функциональной зависимости скорости от причин движения.

Говоря современным языком, рассматривается динамическая задача. То есть с математической точки зрения, идея выведения количественной функциональной зависимости между характеристиками движения и его причинами была прогрессивной и поэтому получила дальней-

шее развитие. Говоря о характеристиках движения, следует иметь в виду, что понятия скорости, силы в XIV в. существенно отличались от современных. Под движением понималось произвольное изменение. В соответствии с традициями древнегреческой физики сравнивать можно было только однородные величины (путь — с путем, время — со временем и тому подобное). Поэтому скорость движения характеризовалась не путем, пройденным в единицу времени, а безразмерным числом (например, отношением движущей силы к сопротивлению). В «Трактате о континууме», написанном между 1328 и 1355 гг., Бравардин называет скорость «качеством движения». Продолжительность движения называется «количеством движения». Время он рассматривает как *бесконечный последовательный континуум*, определяющий и измеряющий очередность, делимый до бесконечности. Движение автор определяет как *прохождение пространственного континуума во времени*. Он утверждает, что одну и ту же траекторию тело может проходить с разными скоростями. Движения могут иметь одинаковую скорость («качество»), но разную продолжительность («количество»).

Существенный вклад в формирование кинематических понятий внесли ученики Бравардина — ученые Мертон-колледжа Оксфордского университета Уильям Хейтесбери, Ричард Суайнхед (Суиссет), Джон Дамблтон, Ричард Киллингтон, создавшие «учение о калькуляциях». «Униформное¹ локальное (то есть пространственное) движение таково, что в любые равные промежутки времени описываются равные пути», — писал Суайнхед в трактате «О калькуляциях». Хейтесбери в сочинении «Правила решения софизмов» определяет равноускоренное движение следующим образом: «... в любую из равных частей времени приобретает равные приращения скорости». В трактате «О местном движении» Хейтесбери вводит понятие мгновенной скорости для неравномерного движения: «В пространственном дифформном движении в любое мгновение скорость определяется по линии², которую прочертила бы наиболее быстродвижущаяся точка, если бы на протяжении она стала бы двигаться униформно с тем градусом скорости, с которым она движется в это мгновение — какое бы мгновение ни взять» [44, с. 140]. Ускорение и замедление Хейтесбери называл соответственно «интенсивностью» и «ремиссией» «местного» или «локального» движения. Общее определение ускорения (отдельное введение ускорения и за-

¹ Униформное — равномерное, дифформное — неравномерное.

² Речь идет о направлении скорости.

медления связывается с отсутствием понятия отрицательного числа) отсутствовало, но в конкретных случаях его характеристика была достаточно ясной. Согласно Хейтесбери, при «униформно-дифформном» (с постоянным ускорением) движении скорость возрастает или уменьшается за равные промежутки времени на равную величину.

Наиболее важным результатом механиков Мертон-колледжа была теорема об эквивалентности равномерно ускоренного движения равномерному движению со средней скоростью, получившая название «мертонское правило». В формулировке Суайнсхеда эта теорема гласит: «Всякая широта движения, униформно приобретаемая или теряемая, соответствует своему среднему градусу, так что столько же в точности будет пройдено, благодаря этой приобретаемой широте, сколько и благодаря среднему градусу, если бы тело двигалось все время с этим средним градусом». Здесь под «широтой» понимается интенсивность качества (движения), а под «градусом» — величина этой интенсивности. В современной интерпретации «мертонское правило» означает, что путь, пройденный при равноускоренном движении за некоторое время, равен пути равномерного движения за то же время со средней скоростью. Доказательства этой теоремы приводятся в трактатах Хейтесбери, Суайнсхеда, Дамблтона, Киллингтона, написанных в 1330–1340 гг.

Одним из крупнейших университетов Европы в конце XII в. был Парижский университет. В 1257 г. теолог и духовник короля Людовика IX Робер де Сорбон создал в Латинском квартале богословский колледж с общежитиями для бедных студентов и квартирами для преподавателей. Через триста лет (1554) этот колледж стал теологическим факультетом Парижского университета, который с той поры стал называться Сорбонной¹.

Видным профессором Парижского университета (в 1327 г. ректором) и Наваррского колледжа был Жан Буридан, известный как автор философского парадокса «буриданова осла»². Полностью разделяя аристотелевы принципы: «Все движущееся должно необходимо приводиться в движение чем-нибудь», Буридан отрицал передачу движения от движителя к движимому телу через посредство среды (воздуха, воды). Он предложил собственную теорию, развивающую взгляды Фи-

¹ В 70-х гг. XX в. реорганизован в 13 самостоятельных университетов.

² Осел, помещенный между двух одинаковых охапок сена, должен умереть от голода, так как не сможет выбрать левую или правую охапку, колеблясь между двумя одинаковыми возможностями.

лопона, Ибн Сины и их последователей, получившую название *теории импетуса*¹.

Анализируя опытные факты, Буридан приходит к выводу, что движитель, приводя в движение перемещающееся тело, внедряет в него определенный напор (*impetus*)² или некоторую двигательную силу, действующую в направлении действия движителя. Этот напор или импетус непрерывно уменьшается сопротивлением воздуха или тяжестью, если тело брошено вверх. Чем больше материи в теле, тем больше импетус. Естественно, круговые движения на небе отличаются от насильственного движения брошенного камня, но все движения можно объяснить понятием импетуса. При падении тела импетус является причиной его ускорения.

Буридановский импетус объединяет в себе комплекс современных понятий. Его нельзя отождествлять ни с импульсом, ни с энергией, ни с силой, ни с ускорением. Но потенциально он содержит в себе некоторые аспекты всех этих важнейших понятий, вошедших в теоретическую механику позднее.

Как видный ученый, Буридан не мог обойти вниманием проблему устройства Вселенной. Он выражает идею относительности движения, сомневается в неподвижности Земли и ее расположении в центре Вселенной, впервые формулирует понятие *инерции* (как один из видов внутреннего сопротивления движению) и *закон инерциального движения* (естественно, в своей трактовке).

Значительный вклад в развитие теории импетуса внес ученик Ж. Буридана — Николь Орем. Эрудит, философ, профессор (ректор, 1356–1363) Наваррского колледжа, в 1363–1377 — каноник в Руане, с 1377 г. епископ Лизье, советник короля Карла V и профессор Парижского университета, он одним из первых начал писать научные труды не на латыни, а на французском языке. В частности, в 1377 г. он написал «Книгу о небе и Вселенной», где высказывает предположение о том, что Земля обладает суточным движением, которого лишены небеса: «И я заявляю, что, во-первых, невозможно доказать обратное с помощью любого опыта, во-вторых, с помощью рассуждений и, в третьих, я приведу соображения в пользу этого мнения» [34, с. 107]. Как

¹В 20-х гг. XIV в. францисканский монах Франческо ди Маркиа в комментариях к «Сентенциям» Петра Ломбардского подробно рассмотрел понятие импетуса — движущей силы, передаваемой не среде, а самому телу.

²Термин впервые введен Буриданом.

известно, далее эта точка зрения получила развитие в знаменитом сочинении Н. Коперника.

Средневековые схоласты, следуя Аристотелю, считали, что движение всегда происходит в некоторой среде, то есть при наличии некоторого сопротивления среды. Поэтому, обсуждая движение небесных тел, движущихся вне среды, без сопротивления, Буридан предполагал наличие у тел внутренней склонности к противоположно направленному движению. Орем продолжил эту идею в комментариях к «Физике» Аристотеля, «О сфере» Сакробоско, «О небе и мире» Альберта Саксонского. В отсутствии сопротивления небесные движения сохраняли бы импульс бесконечно долго, а это привело бы к бесконечно быстрым движениям. Но таковых мы не наблюдаем. Поэтому Орем вводит в рассмотрение сопротивление особого рода. Кроме внешнего сопротивления среды он предполагает наличие у тел внутреннего сопротивления — тенденции к противоположно направленному движению и тенденции к покою. Благодаря Орему, эта точка зрения (существование инерциального сопротивления) была широко распространена в XIV в., а позднее укоренилась в механике в виде свойства инертности тел. Важно подчеркнуть, что идею инертности тел Буридан, а позднее и Орем, распространяли на все тела Вселенной. Тем самым пропагандировалась идея единства, универсальности законов движения земных и небесных тел.

В связи с понятием импульса и осознанием возможности изменения скорости движения тел, в механику входит понятие *ускорения*. Как и все научные понятия, оно формировалось методом последовательных приближений и определяло одно из свойств движения — величину (меру, быстроту, степень) изменения скорости. Считалось, что брошенный вверх камень сначала увеличивает свою скорость, а затем его скорость убывает. Наблюдения Буридана не подтвердили эту точку зрения. Орем же, уверенный в том, что именно так и движется брошенный камень, предложил считать, что импульс является причиной не постоянной скорости, а постоянного ускорения, то есть изменения скорости. Таким образом, из ложной посылки фактически декларировалось часть содержания будущего второго закона Ньютона.

Чрезвычайно перспективной оказалась и еще одна идея Орема — идея *графического, геометрического исследования движения*, высказанная им в «Трактате о конфигурации качеств и движения» (1350). Он предложил изображать время (путь) отрезками прямой, а соответству-

ющие скорости — отрезками другой прямой, перпендикулярной первой. Точнее, речь шла об изображении отрезками прямой количества и качества движения тела. Но если трактовать идею Орема именно таким образом, отождествляя количество и качество движения со временем и скоростью, то получится график изменения скорости в зависимости от времени. Используя идею декартовых координат (возможно, почерпнутую Декартом у Орема), это можно представить рисунком 1.3.

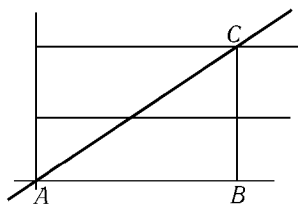


Рис. 1.3

Рисунок, вошедший в историю под названием «диаграммы Орема», наглядно демонстрирует величину скорости (CB) в зависимости от времени (AB). При равномерном движении графиком скорости будет прямая, параллельная (AB), при равноускоренном (падение тела) — наклонная (AC).

Возможность графического изображения функциональной зависимости скорости от времени сделала наглядными многие результаты оксфордских механиков. Во второй части трактата Орем показывает, что путь равномерного движения соответствует прямоугольнику, равноускоренного — треугольнику или трапеции (в зависимости от начальной скорости). В третьей части формулируется и доказывается «мертонское правило». При этом используется предположение, что движения эквивалентны, если площади их конфигураций равны. Таким образом, «мертонское правило» получило ясную геометрическую интерпретацию. Если бы Орем применил свой метод к проблеме падения тел, то смог бы предвосхитить результаты, полученные Галилеем из физических соображений через два с половиной века.

Работы оксфордских и парижских механиков получили развитие в Италии. Об этом свидетельствуют трактаты Джованни Казале, Баджио из Пармы («О движении», «Об интенсификации и ремиссии форм», «Вопросы к трактату о широте форм»), Паоло Венецианского, Анджело да Фассамруно, Джованни Мармюни. Учение «калькуляторов» даже изучалось в университетах. Но к середине XV в., в связи с отсутствием практических приложений и сложностью математического аппарата, оно перестало развиваться.

Значительный вклад в упрочение теории импетуса внес другой ученик Буридана — Альберт Саксонский де Хельмстед — профессор (в 1353 — ректор) Парижского университета. Он оперировал поняти-

ем угловой скорости, различал движение с переменной (в пространстве и времени) скоростью, пытался сформулировать некоторый количественный закон роста скорости падающего тела (считал, что скорость должна расти пропорционально пройденному пути).

Подводя итоги более чем 18-векового пути развития науки (от Аристотеля) следует отметить, что эволюция механико-математических знаний в этот период проходила крайне низкими темпами. Состояние стагнации, переживаемое европейской цивилизацией после ярких успехов древнегреческой и римской культур, было следствием постепенных, но весьма радикальных перемен в системе общественных ценностей.

Длительные экономические трудности, затянувшееся становление европейской государственности, бесконечные разрушительные войны, жесткий культ церкви привели к разрушению высокого авторитета культурных, образовательных и научных ценностей. Перемены в общественном сознании, как результат расширения сети учебных заведений (школ, училищ, университетов), возникновения новых естественно-научных и технических задач, начинают проявляться только с XIV в.

1.4. Механика эпохи Возрождения

Конец средневековья характеризуется зарождением новых общественных отношений. В растущих городах власть постепенно переходит от господ по праву рождения к господам по праву богатства — торговцам, старшинам ремесленных цехов. В связи с ростом строительства городов, церквей, монастырей, оборонных и гидротехнических сооружений, мельниц¹ разного профиля (для помола зерна, распиловки досок, изготовления пеньки, бумагоделательные², железоделательные, сукновальни и другие), изобретением огнестрельного оружия (XIV в.), механических часов с гирями, появляется профессия инженера. Поначалу она не была цеховой и означала лишь совокупность знаний, которыми должен владеть архитектор, скульптор или художник помимо основных профессиональных умений. Очевидно, что инженер для строитель-

¹ Первые мельницы (водяные) строились на горных реках Закавказья (I в.), в странах арабского халифата, где это искусство достигло расцвета (в VIII в. на территории Персии, Ирака, Афганистана появились ветряные мельницы).

² Бумага была изобретена раньше на Востоке. В Самарканде в IX в. ее умели делать из тряпья.