

Очерк истории установления основных начал механики.

(Вступительная лекция к курсу теоретической механики, читаемому в Морской Академии).

А. Н. Крылов.

§ 1. Из всех явлений окружающего нас мира движение тел есть самое обыденное и самое распространенное, и можно сказать, что ни одно действие человека не совершается без движения чего-либо.

От глубочайшей древности остались громадные сооружения, показывающие, что уже тогда существовало умение применять вспомогательные средства и машины для подъема и перемещения грузов.

С незапамятных же, доисторических времен существует пользование судами для плавания по морям, рекам и озерам.

Казалось бы, что все это должно было бы привлечь с издавна внимание пытливых умов и стать предметом изучения и научного исследования.

Между тем действительность показывает, что и тогда, подобно тому, как и теперь, практика далеко опережала теорию, ибо лишь в „Физике“ Аристотеля, жившего с 384 по 322 г. до Р. Хр. можно найти изложение учения о движении и силах и основания учения о машинах. Затем в двух творениях Архимеда (287—212 до Р. Хр.) находится совершенно отличное от аристотелева изложение учения о равновесии простейшей из машин—рычага, учение о центрах тяжести и, наконец, учение о равновесии тел, плавающих в жидкости. Эти два последние учения всецело были созданы Архимедом.

Великий философ Аристотель, хотя и пробыл двадцать лет в школе Платона, девизом которой было: „сюда да не входит не знающий геометрию“, не был истинным геометром; в своем учении о движении исходил из принятого умозрительно основного положения, которое казалось согласным с повседневным опытом каждого и настолько простым, что самое элементарное рассуждение делало его самоочевидным. Но здесь оказалось, что при истолковании обыденных повседневных явлений было упущено из вида или ложно понято весьма важное обстоятельство, так что принятое основное положение не отвечало действительности. Однако прошло двадцать веков, прежде чем это было обнаружено Галилеем.

Учение Аристотеля о равновесии рычага и других машин, к нему сводящихся, приводит к верным выводам, но по своему изложению оно не отличалось геометрической строгостью, присущей классическим творениям древних математиков и, видимо, не удовлетворяло Архимеда, который, давая свое изложение, не упоминает об Аристотеле. Впрочем, надо иметь в виду, что подлинные рукописи Аристотеля находились 120 лет после его смерти под спудом, замурованными в склепе и, значит, не могли быть известны Архимеду.

§ 2. Творения великого сиракузского математика представляют и по сию пору непревзойденный образец геометрической строгости и последовательности умозаключений.

Архимед начинает свое сочинение: „О равновесии площадей и о центрах тяжести“ следующими словами:

- „Положения: 1) Равные тяжести, подвешенные к равным длинам, находятся в равновесии.
- 2) Равные тяжести, подвешенные к длинам неравным, в равновесии не находятся: подвешенная к большей длине опускается вниз.
- 3) Если тяжести, подвешенные к каким бы то ни было длинам, находятся в равновесии и к одной из них что-либо будет прибавлено, то они более в равновесии находиться не будут,—тяжесть, к которой нечто прибавлено, опустится вниз.
- 4) Подобно этому, если что-либо отнять от одной из этих тяжестей, то они более в равновесии не будут,—та, от которой ничего не отнято, опустится вниз“.

Из этих четырех положений, которые можно считать или самоочевидными, или установленными непосредственным легко доступным опытом, Архимед с полной строгостью древней геометрии выводит прежде всего законы равновесия рычага.

К этим четырем положениям у него присовокуплено в самом начале же четыре других, относящихся к центрам тяжести; пользуясь ими и доказанными свойствами рычага, он находит положения центров тяжести разного рода прямолинейных фигур, а затем параболического сегмента.

Второе его сочинение: „О плавающих в жидкости телах“ представляет также недостижимый образец геометрического исследования, в основу которого положены два простых и самоочевидных предположения, из которых затем все выводится точными, строгими рассуждениями и доказательствами. Не надо думать, что Архимед ограничился только самыми элементарными выводами законов равновесия плавающих тел,—нет он применяет эти законы к определению положений равновесия отрезка параболоида вращения при разных отношениях его плотности к плотности жидкости. При этом оказывается, что такой параболоид может находиться в устойчивом положении равновесия

не всегда в том положении, когда его ось вертикальна и вершина внизу, а иногда, и даже чаще, как раз наоборот, т.-е. с вершиною вверх и при наклонном положении оси.

Приняв во внимание, что самое учение о центре тяжести, что определение площадей и объемов, ограниченных кривыми линиями и поверхностями, принадлежит Архимеду и что весь математический аппарат того времени сводился к учению о пропорциях, мы сможем лишь в малой степени дать себе представление о его гениальности.

Итак, можно сказать, что Архимед установил начала новой науки „Механики“, включив ее в область точных умозрительных наук, строгость которой не уступала геометрии, ибо в своем сочинении „О площади параболы“ он пользуется полученными в учении о равновесии рычага результатами для доказательства чисто геометрических истин.

Проходят века и тысячелетия, к учениям Архимеда и Аристотеля не только ничего не прибавляется, но даже многое из них утрачивается. Лишь через восемнадцать веков после Архимеда голландский инженер и ученый *Стевин* делает существенное добавление к учению о равновесии: он находит условия равновесия тяжелого тела на наклонной плоскости; от этих условий ему уже нетрудно было перейти к условию равновесия трех сил, лежащих в одной плоскости и приложенных к той-же точке, т.-е. к так называемому *треугольнику* или *параллелограмму* сил, ставшему затем основною теоремою в учении о равновесии вообще.

Стевин в основание своего рассуждения кладет положение: „вечное движение невозможно“. Истина эта далеко не так очевидна, как положения Архимеда, но Стевин, как инженер, смело ее применяет, ибо его практический опыт не допускает сомнения.

Почти в то же время Галилей дал новые точные основания учению о движении. Но вернемся несколько назад и добавим некоторые подробности о сочинениях основателя древнего естествознания Аристотеля.

§ 3. Аристотель касается механики в трех своих сочинениях: „Механике“, „Физике“ и „О мире и небе“.

Первое из этих сочинений представляет в сущности как бы собрание вопросов или задач с кратко высказанными ответами или объяснениями. В числе этих задач обратим внимание на задачу IV, высказанную так: „Каким образом при помощи рычага малые силы приводят в движение большие грузы?“ В объяснении между прочим говорится: „Относительно рычага надо рассматривать три вещи: точку опоры, представляющую центр, и два груза: движущий и движимый. Движимый груз находится к движущему в обратном отношении длин, и чем груз дальше от точки опоры, тем легче он движется. Причина этому та, которая уже дана в объяснении весов,—точка, которая дальше отстоит от центра, описывает больший круг, поэтому под действием той же силы движущий груз опишет тем больший круг, чем дальше он от точки опоры. Пусть *AB* есть рычаг, коего опора *E*, движимый

груз C , движущий D , тогда по окончании движения этот последний придет в G , поднимаемый же груз—в K .

На этом пояснение заканчивается, при чем по обычаю древних авторов чертеж читатель должен составлять сам; но, сопоставив это пояснение с сказанным в вопросе 1-ом, что „все относящееся к весам приводится к рассмотрению свойств круга, рычаг к весам, все прочие особенности механических движений к рычагу“, можно подметить то общее начало, к которому Аристотель сводит нахождение условий равновесия всех машин, именно: при равновесии скорости перемещения грузов по вертикальному направлению обратно пропорциональны величине этих грузов. Но это общее начало явно не формулировано и ясно и твердо не высказано.

Как бы то ни было, в его механике условия равновесия рычага и других машин, к нему сводящихся, высказаны правильно, хотя и получены путем длинных, не вполне отчетливых и не вполне ясных рассуждений.

Обратим также внимание на задачу XXX: „Почему, когда два человека несут на шесте или на чем-либо ином какой-либо груз, то испытывают неравное давление, если только груз не по середине, а тот большее, кто ближе к грузу?—Потому что при таких условиях шест есть рычаг, коего точка опоры есть груз, из двух же носильщиков ближайший к грузу представляет как бы движимое (сопротивление), дальнейший—двигателя, и чем он дальше от груза, тем легче ему двигать и тем сильнее давление вниз на другого носильщика, ибо груз представляет такой же упор, как будто он был точкою опоры. Когда же груз по середине, то ни на одного не приходится большей нагрузки и ни один не является двигателем, а каждый несет одинаковую тяжесть“. В этих словах всякий найдет правильный способ разложения законной силы на две ей параллельные, приложенные в заданных точках.

§ 4. Как уже было сказано, Аристотель не ограничился одною только статикою или учением о равновесии; его „Физика“ целиком посвящена учению о движении.

„Физика“ Аристотеля считается одним из замечательнейших произведений этого всеобъемлющего мыслителя и служит основанием для тех из прочих его сочинений, в которых он излагает всю совокупность учений о природе, т. е. все естествоведение своего времени.

При теперешней терминологии это сочинение относится к области чистой философии, а не к той группе знаний, которую мы теперь называем физикой, хотя значительная часть сочинения и посвящена учению о движении, но с иной точки зрения, нежели это явление рассматривается в теперешней физике и механике.

Теперешняя физика и механика, основанные во многом на опыте и наблюдениях, а значит, и на свидетельстве чувств и измерениях с неизбежными в них погрешностями, так же мало удовлетворяли бы склонность ума древних греков к точным отвлеченным рассуждениям,

как эти рассуждения, представляющиеся нам во многом не относящиеся к естествознанию и его приложениям, мало удовлетворяют нас.

Аристотель не заботится об установлении точных количественных соотношений между различными величинами, рассматриваемыми при изучении движения тел, он стремится как бы проникнуть в самую сущность этого явления и установить, существует ли оно само по себе или только в нашем представлении, он хочет постигнуть и объяснить, что такое пространство и время, что такое бесконечность, что такое пустота, может ли она существовать, и прочие вопросы подобного же рода. Эти вопросы дают ему возможность проявлять всю силу его логики и все искусство его диалектики и тонкости рассуждений. Для примера приведем несколько выдержек из того, что он говорит о времени, цитируя по французскому переводу Бартеlemi де Ст. Илера.

„Вот несколько соображений,— говорит Аристотель, — которые можно привести, чтобы доказать, что время совсем не существует, а если и существует, то лишь образом, мало ощутимым и весьма неясным“.

„Так, одна из частей времени *была* и ее *более нет*, другая *должна быть* и ее *еще нет*. Однако лишь из этих элементов слагается и бесконечное время и то время, которое мы считаем в непрестанной последовательности. Но то, что составлено из элементов не существующих, представляется и само не обладающим истинным существованием. К этому надо добавить, что для всякого делимого предмета необходимо, по самому свойству его делимости, когда он существует, чтобы существовали и некоторые его части или даже все его части. Но для времени, хотя оно и делимо, одни части *были*, другие *будут*, но ни одной нет в настоящем. Настоящее — момент или мгновение не есть часть времени, ибо часть какой-либо вещи служит мерою этой вещи; с другой стороны, целое должно слагаться из соединения частей, между тем время не состоит из последовательных моментов настоящего. Кроме того самый момент, само настоящее, разграничивающее прошедшее и будущее, — единое ли оно или нет, остается ли оно всегда тождественным и неизменным или же оно постоянно изменяется и постоянно различно?

„Все это такие вопросы, разрешить которые не легко. Действительно, если момент всегда и постоянно другой, то момент, которого уже нет теперь, но который перед этим был, должен был исчезнуть в какое-то мгновение, а тогда последовательные моменты не могут существовать совместно один с другим, ибо предшествующий всегда, по необходимости, уже пропал. Но невозможно чтобы момент пропал в самом себе, ибо его тогда еще не существовало, и невозможно, чтобы предыдущий момент пропал в какой-либо иной момент, следовательно необходимо принять, что невозможно, чтобы моменты следовали слитно один за другим, как невозможно, чтобы на линии точки располагались слитно одна за другою“...

„Мы представляем себе однако, что время не может быть постигаемо без изменений, ибо мы сами, если не испытываем в наших мыслях никакого изменения или если изменение, которое в них происходит,

от нас ускользает, то мы считаем, что не протекло и никакого времени, подобно тому как его нет для тех сказочных людей, которые спят близ героев в Сардосе и которые при своем пробуждении не имеют никакого ощущения времени, ибо они соединяют момент предшествующий с моментом последующим и делают из них один, уничтожая все промежуточные моменты, которых они не замечали. Таким образом, как не было бы времени, если бы момент не стал другим, а был бы тем же самым и одним моментом, так и в том случае, когда не замечают, что это есть другой момент, то кажется, что и за весь промежуток не было времени. Но если время устраняется, когда мы не замечаем никакого изменения, и наш дух представляется нам пребывающим в едином и неделимом мгновении, и наоборот, когда мы чувствуем и различаем изменение, то мы утверждаем, что есть протекающее время, поэтому ясно, что для нас время существует лишь при условии движения. Итак, не подлежит сомнению, что без движения время невозможно и что время не есть движение“.

Разобрав затем соотношение между моментами или мгновениями и временем, сходство и различие между точкой и моментом, Аристотель продолжает: „Итак, время есть *число движения*, но это число не относится к одной и той же точке, которая была бы вместе с тем и началом и концом, как это имеет место на линии, границу частей которой она составляет, но сама не есть часть линии. Мы видели причину этого в том, что точка, взятая на линии, напр., по середине ее, имеет двоякое значение, ибо она одновременно и начало и конец, а это при движении тела включало бы по необходимости некоторое время остановки или покоя. Но ничего подобного не может быть по отношению ко времени, которое течет непрестанно без малейших прерывов. Но ясно, что момент — настоящее, не составляет части времени так же, как подразделение движения не есть движение, как точки не суть части линии, тогда как линии, когда их различают две в одной, составляют части этой одной линии и не суть ее точки. Таким образом, настоящий момент, рассматриваемый как граница между прошедшим и будущим, не есть время, это есть лишь *признак* времени, которое он разграничивает и определяет. Но, поскольку он служит для счета движения и времени, он есть число, с тою однако разницею, что границы непременно принадлежат к тому предмету, который они ограничивают, тогда как отвлеченное число может служить для счета чего угодно, и число десять, например, после того как оно приложено к этим десяти лошадям перед нашими глазами, может совершенно также быть приложено и ко множеству других предметов, число коих также десять“.

Эти выписки дают некоторое понятие о том духе или характере, в котором изложена „Физика“ Аристотеля. Надо помнить, что это сочинение написано 2200 лет тому назад, и если теперь мы при изучении движения „принимая время за переменную независимую“, то не

равносильно ли это тому, что Аристотель хотел выразить словами: „время есть число движения“.

Как видно, „Физика“ не есть сочинение математическое, а философско-критическое, поэтому из общего его объема в 400 страниц, в том издании, которое у меня перед глазами, лишь две страницы уделены установлению количественных соотношений между элементами движения, составляя заключительную главу книги VII. Вот это место: „После того, как показано, каким образом можно сравнивать движения между собою, остается показать те соотношения, которые могут между ними быть. Я вернусь сперва к некоторым началам, которые я уже указывал. Всякий двигатель (сила) двигает всегда нечто движимое в чем-либо и в какой-нибудь мере. Он действует на это движимое в чем-то, т.-е. во времени, он двигает его в некоторой мере, т.-е. переносит его на некоторое расстояние, ибо двигатель движет непрерывно в продолжение времени своего действия. Движимое всегда есть некоторое количество и всегда продвигается на некоторую величину. Обозначим двигатель через А, движимое через В и через С величину, на которую движимое было продвинуто в продолжение времени D, в течение которого движение имело место. В равное время мощность, обозначенная через А, заставит половину движимого В совершить движение вдвое больше С, *расстояние же С она заставит пройти в половинное время D*, ибо при этом сохраняется пропорциональность. Итак, *когда сила остается той же, движимое, уменьшенное вдвое, проходит такой же путь в половинное время*“.

Из этих слов, дважды повторенных, несомненно следует, что Аристотель полагал, что постоянная сила, действуя на данное тело, заставляет его двигаться *равномерно* в продолжение всего времени своего действия, причем скорость этого движения пропорциональна силе, как то видно из дальнейших его слов: „Следовательно, можно установить два других правила, составляющих следствия предыдущего: *если сила и движимое остаются теми же, то движение в половинное время будет вдвое меньше*, если же и сила будет также уменьшена, то она заставит то же движимое совершить половинное движение в такое же время. Пусть, напр., сила Е составляет половину силы А и F есть новое движимое, составляющее половину В; при этих предположениях отношения останутся одинаковыми, и силы будут пропорциональны движимым грузам,—такие две силы произведут равное движение в равное время“.

„Однако не следует думать,—продолжает Аристотель,—что если Е, равная половине А может заставить F, равное половине В, пройти путь С во время D, то что Е сможет также заставить удвоенное F в такое же время пройти путь, равный половине С,—может оказаться, что сила, способная двигать половину движимого тела неспособна двигать целое; так, если А продвигает В на величину С во время D, то может быть, что сила, обозначенная через Е, не будет в состоянии двигать В в продолжение времени D. Эта половинная сила, может быть,

даже не будет в состоянии заставить В пройти какую-либо часть С, не только-что такую, которая составляет от С одинаковую долю как А от Б, ибо может оказаться, что движения совсем не будет. Так, например, если необходима полная сила для продвижения какого-либо груза, то половинная не сможет произвести никакого движения ни в какой промежуток времени, ибо иначе достаточно было бы одного матроса, чтобы приводить в движение корабль, если только силу всех корабельщиков можно было бы подразделять как в отношении числа, так и в отношении расстояния, которое они, действуя совокупно, заставят корабль проходить“.

Эти слова показывают, насколько далек был древний мир от представления о „законе инерции“, разгаданном впервые Галилеем и окончательно сформулированном Ньютоном.

Но приведем еще одно знаменитое место из сочинения Аристотеля „О небе“, где он также говорит о движении. Это сочинение посвящено изложению учения о строении мира, как его в то время представляли другие философы, которых местами Аристотель опровергает, местами дополняет в своем учении.

Тогда считалось, что все состоит из четырех стихий—земли, воды, воздуха и огня. Земля обладает лишь тяжестью, огонь—только легкостью, воздух и вода—как тем, так и другим. Все тяжелое стремится *вниз*, все легкое—*вверх*, поэтому: „тяжело все то, что способно нестись к середине, легко все то, что несется от середины или средоточия мира“... „Самое тяжелое то, что располагается под всем тем, что стремится вниз, самое легкое то, что располагается над всем тем, что идет вверх“. Сообразно этому и движение рассматривается как *согласное природе* или *противное природе*. Само собою понятно, что в этом учении нет и речи об установлении каких-либо количественных соотношений и в изложении Аристотеля все сводится к диалектическим рассуждениям, подобным приведенным выше.

В VI главе 1-й книги он рассматривает такой вопрос: может ли быть бесконечное тело, и будет ли его вес конечный или бесконечный. Понятно, что при отсутствии определения того, что в таком случае следует разуметь под словом *вес*, этот вопрос настолько неопределенный, что рассуждения, сюда относящиеся, не могут обладать достаточною ясностью и точностью. Вот в этом-то рассуждении Аристотель между прочим говорит: „Из сказанного следует, что вес бесконечного тела не может быть конечным, значит, он бесконечный. Следовательно, если и этого быть не может, то в природе не может существовать и бесконечного тела. Что вес не может быть бесконечным, явствует из следующего: если какое-либо тело в некоторое время проходит некоторое пространство, то тем паче оно в меньшее время находится в движении, *но времена находятся в обратном отношении весов, т.-е. если половинный вес в некоторое время проходит столько-то, то удвоенный вес пройдет столько же в половинное время*. Кроме того всякий конечный вес проходит конечное пространство в конечное время. Так как все

происходит, как сказано, то оказывается, что если бы какой-либо вес был бесконечным, то он одновременно и двигался бы, и не двигался бы. Он должен двигаться, ибо он таков же, как и конечный, но еще по необходимости следует, что он не движется, ибо при его движении отношение времени пробега заданного расстояния по сравнению с временем пробега этого расстояния телом конечным должно быть меньше всякого обратного отношения большего к меньшему (меньше всякого числа)... И, показав, что это ведет к противоречию, Аристотель заключает: „невозможно, чтобы был бесконечный вес, подобно этому и легкость“.

В этой выдержке необходимо обратить внимание на те слова Аристотеля, что времена, в продолжение которых тяжелые тела проходят одно и то же пространство, обратно пропорциональны весам, составляли в его время учение бесспорное, общепринятое, которым он пользуется в своем спекулятивном рассуждении.

Но из его сочинений не видно, какие другие выводы делались из этого положения и из прочих приведенных выше, и находилось ли движение какого-либо груза под действием силы, отличной от его веса именно так, как можно было бы думать по сказанному в „Механике“ или нет. Повидимому, нет, и вообще определение движения тела под действием заданной силы древним известно не было.

„Физика“ Аристотеля состоит как бы из двух частей, из которых первая озаглавлена просто: „Физика“, вторая: „Лекции физики“.

В гл. XI книги IV этого последнего сочинения находится следующее место, которое заставляет думать, что движение тел объяснялось действием на них окружающей среды. Вот это место: „Очевидно, есть две возможные причины, чтобы данный груз или данное тело получало более быстрое движение. Это происходит или потому, что среда, через которую оно проходит, различная соответственно тому, движется ли тело в воде, в земле или в воздухе, или потому, что движущиеся тела сами по себе различны и при прочих одинаковых условиях обладают большею тяжестью или легкостью. Среда, через которую тело проходит, есть причина, препятствующая движению тела, в наибольшей степени, когда эта среда имеет движение, противоположно направленное. чем когда она неподвижна. Это сопротивление тем больше, чем труднее среда поддается разделению, а она сопротивляется тем сильнее, чем она плотнее. Положение, напр., что, А проходит путь В в одной среде во время С и в более редкой среде путь D во время Е. Если длина В равна длине D, то движение будет пропорционально сопротивлению среды. Примем, что В есть вода и D, напр., воздух; чем воздух будет легче и менее телесен по сравнению с водой, тем скорее А пройдет путь D, нежели В. Очевидно, *первая скорость будет находиться ко второй в том же отношении, как воздух к воде, и если принять, что воздух вдвое легче воды, то тело пройдет через В во время вдвое большее, нежели через D, и время С, будет вдвое больше времени Е.*

„Следовательно движение тела будет тем быстрее, чем среда, через которую оно проходит, будет менее телесна, менее сопротивляющаяся и легче разделяемая. Но нет отношения для сравнения тела с пустотой (т.-е. отношения плотности тела к пустоте), которое показывало бы, во сколько раз тело превосходит пустоту, подобно тому, как нет отношения числа к нулю... Следовательно нет такового и для движения в пустоте, и если тело в самой легкой среде проходит какой-либо путь в заданное время, то скорость его в пустоте превзойдет всякое возможное отношение“...

Вышеприведенные длинные выдержки сделаны для того, чтобы показать, что учение Аристотеля взято во многом с того, что дает самое простое и непосредственное наблюдение, напр., над перемещением грузов волоком, когда вследствие трения надо для поддержания равномерного движения прилагать к телу постоянную силу. Явление казалось настолько простым, и данное объяснение представлялось как бы настолько согласным с тем, что каждый постоянно сам видел и испытывал, что сущность дела ускользнула от критического анализа Аристотеля и нужен был мощный гений Галилея, чтобы обнаружить заблуждение в том, что в продолжение двадцати веков представлялось невозбуждающим никаких сомнений.

§ 5. *Галилей*, искуснейший наблюдатель и экспериментатор, превосходный математик, умелый практический механик, мыслитель и поэт, сумел своим всеобъемлющим гением отрешиться от авторитета Аристотеля. Мы еще вернемся в своем месте к более подробному ознакомлению с установлением им истинных начал механики на основании точных опытов, обобщенных в строго математическое рассуждение.

В противность учению Аристотеля он показал, что тело под действием постоянной силы движется равномерно ускоренно, а не равномерно, как предполагалось в учении Аристотеля, что тела падают с одинаковой высоты в одно и то же время независимо от их веса, что тело, брошенное наклонно к горизонту, описывает параболу, при чем Галилей показал, как рассчитать ее параметр при данной скорости и угле бросания, подробно исследовал движение тяжелого тела по наклонной плоскости и, весьма остроумно и точно обставив опыт, воспользовался им для подтверждения своих законов движения падающих тел. Переходя к другому пределу, т.-е. когда плоскость горизонтальна, он заключил, что тело, не подверженное силе тяжести, будет двигаться равномерно и прямолинейно, установив таким образом закон инерции и независимости действия силы от состояния тела.

Все эти основные для механики открытия изложены им в сочинении под заглавием: *Discorsi e dimonstrazioni mathematiche intarno a dua scienze alla mecanica e i movimenti locali*, вышедшем в Лейдене в 1638 году.

В этом сочинении, разделенном на шесть дней или бесед, изложение ведется как бы беседами между тремя лицами: *Salviati*, *Sagredo* и *Simplecio*, при чем первый излагает свои новые воззрения двум другим собеседникам, предлагающим ему разные вопросы. *Sagredo* по боль-

шей части его поддерживает, Simplicio же упорно отстаивает воззрения Аристотелевой философии, но, побеждаемый аргументами противников, принуждается к сдаче.

Мы видели, что, по мнению Аристотеля, тела падают со скоростями, пропорциональными их весу, т.е. проходят тот же путь в тем меньшее время, чем вес больше, так что по этому учению: „гиря весом в 100 фунтов падает с высоты 100 фут в такое же время, как гирия в 1 фунт с высоты в 1 фут“, — приводит пример *Salviati*. Точно так же по Аристотелю при падении тела в какой-либо среде—воде или воздухе или вообще в срединах разной плотности—оно движется „к своему месту“ со скоростями, обратно пропорциональными плотности среды, что естественное свободное, т.е. без действия какой-либо внешней причины движение тел есть равномерное круговое.

Галилей, опровергая эти воззрения, прежде всего изменяет самую постановку вопроса: Аристотель всегда спрашивает, почему происходит то или иное явление, и затем дает свое метафизическое объяснение, считая установленным, что явление происходит именно так, как в вопросе указано. Галилей прежде всего спрашивает, как явление на самом деле происходит, и лишь по установлении этого изыскивает причину, прибегая к точным, весьма остроумно обставленным опытам, хотя и с самыми простыми средствами.

Так относительно падения тел он между прочим говорит: „Если бы не было сопротивления воздуха, то все тела падали бы одинаково, т.е. с одинаковою скоростью при равных высотах падения“... „двигаясь при этом равномерно ускоренно, так что в равные промежутки времени скорость возрастает на равные величины“... „При движении в сопротивляющейся среде, по мере возрастания скорости, падающее тело встречает постоянно увеличивающееся сопротивление, вследствие чего происходит постоянное уменьшение ускорения и, наконец, сопротивление достигнет такой величины, что ускорения не будет и тело будет продолжать двигаться дальше равномерно“... „При падении тела в какой-либо среде надо иметь в виду, что на тело действует не полный его вес, а лишь избыток этого веса над весом вытесненной телом жидкости или среды. Так, напр., если принять, что свинец в 10000 раз тяжелее воздуха, черное же дерево в 1000 раз, то от величины скорости, которая в пустоте была одинакова (подразумевается в конце равных промежутков времени, считаемых от начала падения), воздух отнимет для свинца одну часть из 10000, от скорости же черного дерева одну из 1000, т.е. 10 частей из 10000. Поэтому, если кусок свинца и кусок черного дерева падают с некоторой высоты, которую в пустоте они прошли бы в одинаковое время, то в воздухе из 10000 единиц пройденной длины свинец потеряет одну единицу, дерево же 10, значит по истечении сказанного времени кусок свинца опередит дерево на 9 единиц“... „Подобным образом можно рассчитать и скорости, которые будет иметь то же самое тело, падая в различных срединах, при чем надо исходить не из рассмотрения различного сопротивления оказы-

ваемого средой, а рассматривать избыток веса тела над весом вытесненной им среды"... „Так, если взять тело, которое лишь немного тяжелее воды, напр., горный дуб, то, если кусок его весит 1000 драхм, соответствующее количество воды 950 драхм и воздуха 2 драхмы, из полной скорости в 1000 единиц в воздухе останется 998, в воде же всего 50, и, значит, это тело будет падать в воздухе приблизительно в 20 раз скорее, нежели в воде"..... „Необходимо также помнить, что движение в воде вниз совершается только тогда, когда удельный вес тела больше нежели воды, а такие тела в несколько сот раз тяжелее воздуха, поэтому, чтобы найти скорости в воде и в воздухе, можно пренебрегать потерю скорости в воздухе и считать, что эта скорость такая же, как в пустоте, тогда можно сказать, что скорость в воде и воздухе относятся между собою как вес тела к избытку этого веса над весом вытесненной воды"..... „Мы увидели бы, что все это гораздо лучше согласуется с опытами, нежели рассуждения Аристотеля“.

Все свои утверждения Галилей подтверждает опытами, произведенными при помощи самых простых средств, но точными благодаря удивительно остроумной их обстановке. Так, напр., чтобы доказать, что тела действительно падают, двигаясь равномерно ускоренно, он сперва математически доказывает, что при таком движении пройденные от начала движения пути пропорциональны квадратам времени, и уже это свойство проверяет опытом.

Этот опыт он обставил так: показав предварительно строгим рассуждением, также затем подтвержденным опытом, что при движении по наклонной плоскости тело приобретает при данной высоте падения всегда одну и ту же скорость независимо от уклона плоскости, он заключил, что и движение по наклонной плоскости тоже равномерно ускоренное, при чем ускорение составляет от полного ускорения при свободном падении такую же долю, как высота плоскости от ее длины. Взяв доску в 18 фут длиною, 9 дюймов шириною и 3 дюйма толщиною и приделав по длине ее ребра дорожку немного более дюйма шириной, он оклеил ее гладким пергаментом. По этой дорожке он пускал катиться совершенно гладко отполированный медный шарик, давая доске различный уклон. Чтобы измерять время, он уже не довольствовался, как в других случаях, счетом ударов своего пульса, а взял ведро с водой и вставил в дно его тонкую трубочку, которую открывал при пуске шарика и прикрывал пальцем по проходе им отмеченных длин; вытекающая вода собиралась в поставленный сосуд и взвешивалась, количество воды было пропорционально соответствующим промежуткам времени, пройденные же от начала движения пути оказались пропорциональными квадратам их, т.-е. вдвое большему количеству вытекшей воды соответствовал в четверо больший путь, и при том каков бы ни был уклон плоскости.

Чтобы показать, что все тела падают с одинаковым ускорением если пренебречь сопротивлением воздуха, Галилей прибег к опытам

с маятниками, подвешивая к тонким нитям одинаковой длины шары из разных материалов;—все маятники качались одинаково, т.-е. делая в равные промежутки времени одно и то же число размахов, хотя величина размахов для легких тел убывала быстрее, нежели для тяжелых.

Установив и проверив опытом законы падения тел, т.-е. прямолинейного их движения под действием сил тяжести, Галилей переходит к рассмотрению движения тел, брошенных или горизонтально, или наклонно к горизонту. Приступая к изложению этого учения, он говорит: „Если тело не встречает сопротивления движению по горизонтальной плоскости, то из разъясненного при рассмотрении движения по наклонной плоскости следует, что это движение равномерное и на беспредельной плоскости будет продолжаться без конца; если же эта плоскость ограничена, а тело тяжелое, то, после того, как оно достигнет края плоскости, при дальнейшем продолжении им своего движения к его не уничтожимому горизонтальному движению присовокупляется движение, производимое силою тяжести, и образуется составное движение, которое я называю движением брошенного тела и которое складывается из равномерного горизонтального движения и равномерно ускоренного вертикального“. Высказав это положение, Галилей подробно исследует это движение, показывает, что траектория есть парабола, и исследует ее свойства.

Из этих выдержек можно видеть, что открытые и установленные Галилеем истинные законы падения тел, т.-е. свободного их движения под действием силы тяжести, во всем совершенно противоречат представлениям Аристотеля. Вместе с тем видны те начала, пользуясь которыми можно определить движение тела под действием любой постоянной силы. Движение здесь предполагается поступательным, и тело мысленно сведенным как бы к одной точке

§ 6. Непосредственным продолжателем работ Галилея в дальнейшем ходе развития механики был *Гюйгенс*, но необходимо упомянуть про современника Галилея, великого астронома *Кеплера*, который хотя сам и не оставил сочинений по механике, но своими астрономическими открытиями способствовал установлению в ней величайшего из законов природы. Кеплер, задавшись целью найти истинные законы движения планет, применил к их разысканию эмпирический способ: он сперва на основании обработки наблюдений установил вид орбит независимо от каких-либо предположений; затем он задавался какою-либо гипотезою, иногда самую фантастическою, и подвергал ее проверке при помощи *вычислений*, сличая вычисленные на основании сделанной гипотезы места планеты, движение которой исследовалось, с наблюдаемыми, почерпая последние по преимуществу из унаследованных им многолетних и точнейших по тому времени наблюдений Тихо Браге. Открытые Кеплером законы движения планет и дали затем через пятьдесят лет Ньютону возможность установить закон всемирного тяготения.

§ 7. Гюйгенс, родом знатный голландец, прошедший значительную часть своей жизни в Париже, по разнообразию своих талантов не уступал Галилею, может быть даже превосходя его математическим дарованием. Главнейшее сочинение Гюйгенса по механике есть вышедшее в 1673 году: „*Horologium oscillatorium sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*“. Сочинение это заключает пять частей, в первой из которых дается описание устройства часов с маятником, приводимым в движение гирей или пружиной. Главное изобретение Гюйгенса состояло в устройстве „спуска“, благодаря которому ход часов регулируется качаниями маятника, и вместе с тем при каждом качании маятник получает некоторый толчок, поддерживающий его движение, которое иначе быстро бы затухало от трения и сопротивления воздуха. Во второй части он развивает Галилеево учение о падении тел, о движении тел по наклонной плоскости, обобщает понятие об ускорении и применяет его к рассмотрению движения тела, брошенного вверх вертикально, наконец рассматривает замечательные свойства движения тела по циклоиде, плоскость которой вертикальна. Третья часть—чисто геометрическая, здесь устанавливается учение о кривизне кривых, их эволютах и эвольвентах. Четвертая глава посвящена учению о центре качания, иными словами теории „физического“ маятника, т.е. твердого тела конечных размеров, качающегося около неподвижной горизонтальной оси и разысканию длины такого „математического маятника“, время размаха которого было бы равно времени размаха данного физического.

Сочинение заканчивается рядом теорем о „центробежной силе“ высказанных без доказательства. В этом же сочинении Гюйгенс дает в виде особой теоремы зависимость между временем одного размаха маятника, его длиной и временем падения с высоты, равной длине маятника. Эта теорема дает ему возможность по времени одного размаха маятника найти ту высоту, с которой тело падает в первую секунду времени, иными словами найти „ускорение силы тяжести“.

§ 8. В 1686 году появилось в свет „величайшее из всех, по словам Лагранжа, произведений человеческого ума“, именно сочинение Ньютона: „*Philosophiae naturalis principia mathematica*“.

В этом сочинении Ньютон окончательно устанавливает начала динамики, т.е. учения о движении тел под действием каких угодно заданных сил и доводит это учение до высокой степени совершенства. Открыв мировой закон всемирного тяготения, Ньютон прилагает его к исследованию движений небесных тел и полагает те незыблемые основы небесной механики, согласие сложнейших выводов которой с точнейшими наблюдениями и доставляет неопровержимое подтверждение высказанных Ньютоном начал.

В предисловии к этому сочинению Ньютон высказывает свой взгляд на значение механики, ее место в ряду естественных наук и на основную ее задачу. Мы приведем некоторые выдержки из этого предисловия

„Древние придавали большое значение изучению механики при исследовании явлений природы... Они рассматривали механику двояко, теоретическую, развиваемую точными доказательствами и рассуждениями, и прикладную; к этой последней относятся все те производства и ремесла, которые называются механическими и от которых и сама наука получила свое название. Но так как в работе ремесленники довольствуются лишь малою степенью точности, то и образовалось мнение, что механика тем и отличается от геометрии, что все вполне точное принадлежит геометрии, менее точное относится к механике. Но погрешности заключаются не в самом ремесле или искусстве, а принадлежат исполнителю работы, — кто работает с меньшею точностью, тот худший механик, и если бы кто-нибудь смог исполнить работу с совершеннейшею точностью, тот и был бы наилучшим из всех механиков.

„Однако самое проведение прямых линий и кругов, служащее основанием геометрии, в сущности относится к механике. Геометрия не учит тому, *как* проводить эти линии, но предполагает выполнимость таких построений. Предполагается также, что приступающий к изучению геометрии уже ранее научился точно чертить круги и прямые линии; в геометрии показывается лишь, каким образом при помощи проведения этих линий решаются разные вопросы и задачи. Само по себе черчение прямой и круга составляет также задачу, но только не геометрическую. Решение этой задачи заимствуется из механики, — геометрия учит лишь пользованию этими решениями. Геометрия за то и прославляется, что, заимствовав извне столь мало основных положений, она столь многого достигает.

„Итак, геометрия основывается на механической практике и есть ни что иное, как та часть общей механики, в которой излагается и доказывается искусство точного измерения. Но так как в ремеслах и производствах приходится по большей части иметь дело с движением, то обыкновенно все касающееся лишь величины относится к геометрии, все касающееся движения — к механике.

„В этом смысле *рациональная механика* есть учение о движениях, производимых какими бы то ни было силами, и о силах, требуемых для производства каких бы то ни было движений, *точно изложенное и доказанное*“.

Ньютон, являющийся истинным творцом современной теоретической или рациональной механики, и дал вышеприведенное наиболее точное и наиболее полное определение этой науки.

Чтобы показать, что такая наука не есть ствлеченное умозрение, Ньютон ставит основною задачею механики: „Из рассмотрения совершающихся явлений движения найти силы природы и по найденным силам доказать и объяснить и прочие явления“.

Задача механики, так поставленная, делает эту науку основой современного естествознания и современной техники, надо лишь, не-

престанно следуя за Ньютоном, изучать совершающиеся в природе явления и силы, их производящие.

При таком изучении явлений приходится выделять то, что есть в них главное и существенное. Это главное и существенное обобщать и облекать в отвлеченную, идеальную форму, подобно тому как это сделано в геометрии с теми образами, которые составляют предмет ее изучения, и относительно этого обобщенного и идеального высказывать точные положения и выводить вытекающие из них следствия, которые затем сличать с наблюдением и опытом. Для такого пути исследования природы Ньютон высказал следующие четыре правила умозаключений.

1) Не должно допускать большего числа причин явления природы, как только те, которые верны и которых достаточно для объяснения совершающегося.

„Природа проста и не прибегает к роскоши излишнего числа причин для своих явлений,“—говорит Ньютон, поясняя это правило.

2) Одинаковым явлениям должно по возможности приписывать и одинаковые причины.

„Так, напр., дыханию человека и животных, падению камня в Европе и Америке, свечению солнца и кухонного очага, отражению света на земле и на планетах“.

3) Такие свойства тел, которые не могут быть ни усиляемы, ни ослабляемы и которые принадлежат всем телам, доступным испытанию, должно почитать за общие свойства всех тел.

Напр., протяженность тел постигается нашими чувствами, и мы приписываем ее всем телам; что все тела непроницаемы, также выводится на основании опыта, а не умозрения,—все, с чем мы имеем дело, непроницаемо, это свойство и почитается общим.

4) В опытной естественной науке должно рассматривать предложения, полученные через наведение из рассмотрения явлений, как вполне точные или весьма близкие к полной точности, не взирая на противоположные гипотезы, которые можно бы составить, пока не обнаружатся такие явления, которыми эти предложения еще более уточняются или оказываются допускающими исключения.

„Так следует поступать, чтобы допущения не преобладали над выводами“.

§ 9. Ньютон начинает изложение своих „Начал“ с определения тех основных понятий, с которыми придется иметь дело. Эти определения следующие:

1) *Количество материи* (масса) есть мера таковой, пропорциональная плотности и объему ее.

2) *Количество движения* есть мера такового, пропорциональная скорости и массе.

3) *Врожденная сила материи* есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, предоставленное самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

„Эта сила всегда пропорциональна массе и если и отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее“.

4) *Приложенная сила* есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

„Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое новое состояние вследствие одной только инерции“.

5) *Центростремительная сила* есть та, с которою тела к некоторой точке, как к центру, отовсюду притягиваются, гонятся или как бы то ни было стремятся.

„Такова сила тяжести, под действием которой тела стремятся к центру земли; магнитная сила, которою железо притягивается к магниту, и та сила, какова бы она ни была, которою планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и вынуждаются обращаться по кривым линиям“...

6) *Абсолютная* величина центростремительной силы есть мера большей или меньшей мощности самого источника ее распространения из центра в окружающее его пространство.

7) *Ускорительная* величина центростремительной силы есть мера, пропорциональная той скорости, которую она производит в течение данного времени.

8) *Движущая* величина центростремительной силы есть ее мера, пропорциональная количеству движения, которое ею производится в течение данного времени.

Пояснив затем смысл этих определений и основных понятий о времени и пространстве и объяснив, что называется относительным движением, Ньютон высказывает следующие:

Аксиомы или законы движения.

1) Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние.

2) Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует.

3) Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе взаимодействия двух тел друг на друга между собою равны и направлены в противоположные стороны.

Как видно, эти законы, обобщая положения Галилея и Гюйгенса, в корне противоречат аристотелевым учениям о том, что каждому телу присуще свойство тяжести или легкости, заставляющее его идти „к своему месту“. Материи присуще основное ее свойство „инерция“, по которой всякое тело без действия внешней причины или находится в покое, или движется равномерно и прямолинейно; тело не может

возбудить движение самого себя, но оно может действовать на другие тела, заставляя их двигаться, причем эти действия между телами всегда взаимны и подчинены 3-му закону Ньютона.

Вот из этих-то положений, принятых за аксиомы, но аксиомы, умозрительные, а являющиеся обобщением наблюдаемых явлений, все остальные предложения механики и свойства движения выводятся уже чисто математическим путем.

Получение основных положений механики в соответствии с приведенными выше правилами из рассмотрения простейших и очевиднейших явлений, строго математическое развитие из этих немногих положений всех дальнейших и сложнейших ее выводов, полное их согласие с наблюдаемыми явлениями и придает этой науке ту степень достоверности, что всякий ее правильно и математически точно обоснованный вывод почитается такою же непреложною истиною, как истины геометрические.

§ 10. Вопросы механики требуют для своего решения применения исчисления бесконечно-малых, которое также было открыто в 1670-х годах Ньютоном и Лейбницем. Ньютон хотя и владел этим исчислением, но дает о нем в своих „Началах“ лишь краткие указания и пользуется по большей части геометрическими приемами, аналогичным способом применявшимися древними авторами.

Первая половина XVIII века была периодом быстрого развития вновь открытых дифференциального и интегрального исчислений и их приложений. Естественно, что и механика не была оставлена в стороне. Так, в 1736 году издана была нашей Академией Наук в двух томах „Механика“ Эйлера, представляющая первое полное руководство, в котором этот предмет изложен чисто аналитически.

Затем следовали сочинения Даламберта, того же Эйлера о движении твердого тела, отдельные статьи и работы братьев Бернулли и пр. Наряду с теоретической механикой развивались и ее приложения к вопросам астрономии, т. е. к определению движения небесных светил и тех „возмущений“, которые их взаимное тяготение вносит в их движение, зависящее главным образом от притягательной силы солнца. Особенные трудности представляло теоретическое исследование движения луны, перемещение перигея которой, казалось, не согласовалось с законом тяготения, пока Клеро не нашел причины несогласия в том, что нельзя было отбрасывать в получаемых рядах тех членов, которые до подробного исследования казались малыми, а после такового оказались имеющими существенное значение.

В последней четверти XVIII века два имени получают преобладающее значение — Лагранж и Лаплас; первый — в вопросах чистой математики и в развитии общих методов решения вопросов теоретической механики, второй — в приложении к вопросам о движении небесных светил.

Наконец, в 1788 году вышло в свет сочинение Лагранжа „Mécanique Analytique“, в котором эта наука изложена в стройной системе,

исто аналитическим путем без единого чертежа, исходя из одного общего начала. В нашем курсе мы будем пользоваться многими выводами Лагранжа, знакомя таким образом с наиболее простыми и общими результатами и методами их получения.

В 1799 году вышел первый из пяти томов „Небесной механики“ Лапласа. Это сочинение несравненно труднее для изучения, нежели сочинение Лагранжа, и из него лишь весьма немногие отделы находят место в общем курсе механики.

В XIX веке с одной стороны совершенствовались аналитические приемы решения вопросов механики, и здесь на первое место выступает имя знаменитого немецкого математика Якоби, методы которого интегрирования дифференциальных уравнений механики составляют предмет специальных курсов; с другой стороны развивались приложения механики к изучению движения жидких и упругих тел.

Совершенно особняком стоит имя французского геометра Пуансо, который сумел придать сперва в 1808 году статике, а затем в 1851 учению о вращательном движении твердого тела геометрическую форму необыкновенной простоты и изящества.
