СОЦИАЛЬНАЯ ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Игорь Сергеевич Дмитриев

доктор химических наук,
профессор Института философии человека
Российского государственного педагогического
университета им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия;
e-mail: isdmitriev@gmail.com

Континентальная парадигма островной науки (Кто стал создателем «ньютонианской науки»?)

УДК: 001(092)
DOI: 10.24411/2079-0910-2020-14001

В статье показано, что распространенное в литературе по истории и философии науки понятие «ньютонианская парадигма», формирование которой связывают с публикацией трактата И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» (1687), лишено исторического смысла. При всей важности этой работы Ньютона она не могла быть положена в основание новой парадигмы по крайней мере по двум причинам: это отсутствие ясной и правильной формулировки второго закона механики и выбор автором геометрического способа изложения материала и доказательств. Фактически новая парадигма аналитической механики была сформирована в XVIII столетии на континенте усилиями таких ученых, как И. и Д. Бернулли, Л. Эйлер, А. Клеро, Ж. Даламбер, Л. Лагранж и др. Кроме того, из приведенного анализа следует, что так называемая научная революция раннего Нового времени происходила в два этапа: натурфилософский этап (XVI–XVII вв.) и собственно научный этап (XVIII в.).

Ключевые слова: И. Ньютон, Л. Эйлер, второй закон механики, дифференциальное исчисление, научная революция.

Благодарность

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 18-011-00920А «Революционные трансформации в науке как фактор инновационных процессов: концептуальный и исторический анализ».

«Второй закон движения Ньютона, F = ma, — это душа классической механики, и подобно всем душам он неощутим».
Фрэнк Вильчек [Wilczek, 2004, p. 11]

В начале июля 1687 г. в Лондоне был опубликован трактат И. Ньютона «Математические начала натуральной философии» («Philosophiae Naturalis Principia Mathematica») [*Newton*, 1687], в котором были сформулированы основные законы того раздела науки, который принято называть *классической механикой*. Сам И. Ньютон, следуя традиции, предпочитал называть созданную им механику «рациональной» [*Ньютон*, 1989, с. 1].

По общепризнанному мнению, «Начала» сыграли выдающуюся роль в истории науки. В известной монографии Т. Куна «Структура научных революций» среди наиболее важных научных парадигм автор называет «ньютонианскую» [*Кун*, 1975, с. 51–52][1]. Согласно Куну (и такая точка зрения весьма распространена в литературе), плеяда «блестящих европейских специалистов по математической физике» занималась «переформулировкой» теоретической механики с целью «придать ей форму, более удовлетворительную с логической и эстетической точки зрения, не изменяя ее основного содержания» [Там же, с. 54]. Такая «переформулировка парадигмы» требовалась в силу того, что «практическое применение “Начал” не всегда оказывалось легкой работой», что, с одной стороны, «объясняется определенной тяжеловесностью (“Начал”. — *Прим. И. Д.*), неизбежной в любом научном начинании, а с другой — тем, что в отношении применения слишком многое из содержания этого труда лишь подразумевалось. Во всяком случае для многих приложений “Начал” к “земным” проблемам методы, развитые, по-видимому, для другой области континентальными математиками, выглядели намного более эффективными» [Там же].

Иными словами, в «Началах» И. Ньютона была предложена новая парадигма, тогда как ученые континентальной Европы преуспели в применении «Начал» к «земным» проблемам, в силу того что развитые ими методы «выглядели намного более эффективными», чем метод Ньютона. В итоге, усилиями Даламбера, Лагранжа, Гамильтона, Якоби и других исследователей, удалось «переформулировать парадигму» Ньютона и «представить явные и скрытые идеи “Начал” и всей континентальной механики в логически более связном варианте» [Там же].

Однако чтобы парадигму «переформулировать», ее сначала надо создать, хотя бы в «тяжеловесном» виде. Кун исходит из того, что такая парадигма действительно была создана Ньютоном, хотя у нее были известные недостатки, неизбежные в любом научном начинании. И далее, обращаясь к этой парадигме (в которую, разумеется, были включены и три закона динамики), Кун, однако, рассматривает почти исключительно закон тяготения и полемику вокруг него, вспоминая о «законах Ньютона» лишь эпизодически. Таким образом, из двух граней ньютонианской парадигмы — одна из которых соотносится с небесной механикой, а другая — с «земной» — Кун преимущественное внимание уделяет именно первой, где английский ученый достиг наибольших успехов.

Поскольку Кун представляет «ньютонианскую парадигму», нашедшую свое исходное воплощение в «Началах», как одну из важнейших в истории науки, уместно

[1] Соответственно, в «Дополнении 1969 года» Кун говорит о ньютонианской революции, характеризуя ее как «крупную» [Там же, с. 227].

напомнить, что под парадигмой он подразумевал «некоторые общепринятые примеры фактической практики научных исследований — примеры, которые включают закон, теорию, их практическое применение и необходимое оборудование, — все в совокупности дают нам модели, из которых возникают конкретные традиции научного исследования. Таковы традиции, которые историки науки описывают под рубриками “астрономия Птолемея (или Коперника)”, “аристотелевская (или ньютонианская) динамика”, “корпускулярная (или волновая) оптика” и так далее» [Там же, с. 27–28]. Разумеется, оговаривает Кун, парадигма — это не нечто застывшее в своей изначальной форме, но «она представляет собой объект для дальнейшей разработки и конкретизации в новых или более трудных условиях» [Там же, с. 42], и свой статус парадигмы приобретают «потому, что их использование приводит к успеху скорее, чем применение конкурирующих с ними способов решения некоторых проблем, которые исследовательская группа признает в качестве наиболее остро стоящих. Однако успех измеряется не полной удачей в решении одной проблемы и не значительной продуктивностью в решении большого числа проблем. Успех парадигмы <…> вначале представляет собой в основном открывающуюся перспективу успеха в решении ряда проблем особого рода. Заранее неизвестно исчерпывающе, каковы будут эти проблемы. Нормальная наука состоит в реализации этой перспективы по мере расширения частично намеченного в рамках парадигмы знания о фактах» [Там же, с. 43].

В «Дополнении 1969 года», где было введено понятие о «дисциплинарной матрице», в качестве одного из видов ее элементов (наиболее адекватного ранее использованному термину «парадигма») Кун называет общепризнанные образцы решения научных проблем[2]. «Ученые решают головоломки, моделируя их на прежних решениях головоломок» [Там же, с. 239]. Иными словами, речь идет о «способности использовать решение задачи в качестве образца для отыскания аналогичных задач как объектов для применения одних и тех же научных законов и формул» [Там же, с. 240].

Итак, принимая во внимание сказанное выше, можно констатировать, что, согласно Куну, «ньютонианская парадигма», *во-первых*, была представлена в «Началах» в относительно сформированном виде и открывала «перспективу успеха» в решении ряда проблем; *во-вторых*, она вела к успеху в описании механических явлений «скорее», чем конкурирующие с ней способы решения проблем (главным конкурентом стала картезианская физика); *в-третьих*, ньютонианская парадигма (читай «Начала») дала образцы решения механических проблем и «некоторые общепринятые примеры фактической практики научных исследований» (закон, теорию, подходы и методы (алгоритмы) решения задач, относящихся к данной области знания, и т. д.). Что же касается представителей семейства Бернулли, Л. Эйлера, А. Клеро, Ж. Лагранжа и других «континентальных ученых», то они *развивали* исходную ньютонианскую парадигму, расширяя область ее применения и обогащая новыми математическими методами.

Цель данной работы — показать, что при всей эпохальной значимости трактата Ньютона его нельзя в полной мере рассматривать как источник новой парадигмы. Ньютон оказал очень важное, но далеко не исключительное влияние на развитие механики в XVIII столетии. Многое было сделано до него (особенно Г. Галилеем,

[2] Кстати, именно здесь Кун в качестве примера обращается ко второму закону Ньютона.

И. Кеплером, Р. Гуком, Х. Гюйгенсом и др.), многое — и даже очень многое! — после публикации «Начал». Парадигма в механике (особенно если иметь в виду ее вторую — «земную» — грань), оказавшая глубокое влияние на всю физику, рождалась на континенте в первую очередь благодаря исследованиям представителей Базельской школы, а также работам великой тройки: Д'Аламбера, Эйлера и Лагранжа. И если они что и развивали (и переформулировали), то скорее картезианские и особенно лейбницианские концепции и методы, тогда как законы Ньютона в лучшем случае имели, если воспользоваться выражением Куна, «парадигмальный характер», т. е. заменяли парадигму [Там же, с. 228]. Утверждение же Куна о том, что «успех парадигмы <...> вначале представляет собой в основном открывающуюся перспективу успеха в решении ряда проблем особого рода», применительно к роли «Начал» в развитии механики в XVII–XVIII вв. может быть принято лишь с большими оговорками.

Загадка второго закона

Начну с общего замечания: то, что в «Началах» представляется наиболее ценным и значимым для нас (и что было зафиксировано в бесчисленном числе учебников и научных трудов), отнюдь не совпадает с тем, что представлялось важным и интересным самому И. Ньютону и его современникам. В частности, современный читатель, если у него нет специального интереса к тексту «Начал», главное внимание обращает на вводную часть трактата Ньютона, включающую авторские и издательские предисловия, определения основных понятий и пояснения к ним, а также раздел *Axiomata, sive Leges motus* («Аксиомы, или Законы движения»), где сформулированы основные законы механики. Специалистов по истории и философии науки привлекает также первый раздел Книги III «Правила умозаключений в физике» и отдельные фрагменты из других частей, главным образом посвященные закону тяготения. Однако сам Ньютон не считал приведенные им во вводной части трактата три закона движения своей заслугой. Он полагал, что первые два из них были сформулированы Галилеем и ко времени написания «Начал» представляли собой общеизвестные истины, “the background knowledge of his days” [*Guicciardini*, 2009, p. 380, n. 34]. Давид Грегори, шотландский математик и астроном, который в 1694 г. провел несколько дней с Ньютоном, занимаясь подготовкой второго издания “Principia”, начинает свои детальные комментарии к этому сочинению с первого раздела Книги I, опустив вводную часть[3] и не написав ни слова о приведенных там дефинициях и законах движения.

Ньютон и его сторонники понимали «Начала» как трактат, в котором ряд задач механики сформулирован на языке математики, а точнее — на языке геометрии и в терминах теории пропорций. Более того, геометрические построения Ньютона иногда рассматривались как некий эквивалент механического способа вычерчивания кривых (в том числе и кривых второго порядка, конических сечений)[4]. Главная

[3] David Gregory's Notae in Newtoni Principia Mathematica Philosophiae Naturalis // Archive Royal Society London MS 210.

[4] В работах Ньютона (в том числе и в «Началах») геометрические фигуры генерировались непрерывным движением, в чем сказалось влияние Декарта. В сочинении «О квадратуре

же задача «Начал», как она понималась многими современниками Ньютона, состояла в математическом определении траектории движения тела при заданных силах и (обратная задача) характера сил, под действием которых тело движется по заданной траектории.

Особо следует сказать о втором законе движения. Если в "De motu corporum in gyrum" (рукописный набросок, относящийся к концу 1684 г.) этот закон приводится в контексте рассуждений об измерении силы по вызванному ее действием отклонению траектории движения тела от траектории инерционного движения, то в «Началах» этот закон сформулирован в более обтекаемой форме: «Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует» [*Ньютон*, 1989, с. 40]. В латинском варианте: "*Mutationem motus* proportionalem esse *vi motrici impressae*, & fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimatur" [*Newton*, 1871, p. 13; курсив в цитате мой. — *Прим. И. Д.*].

Как видим, в оригинальном тексте сказано «изменение движения», а не «изменение количества движения», как в русском переводе А. Н. Крылова, который полагал, что Ньютон понимал под термином "motus" не просто движение, но «нечто измеримое, как бы заключающееся или содержащееся в движущемся теле» [*Ньютон*, 1989, с. 24]. М. Джеммер перевел выражение "mutationem motus" еще более смело, как "rate of change in motion" [*Jammer*, 1999, p. 125]. Однако Ньютон в период между 1684 и 1693 г. записывал формулировку второго закона четырнадцать раз, никогда не употребляя выражения "quantitas motus", только "motus".

Если обратиться к предложению VI «Начал» [*Ньютон*, 1989, с. 82] или к теореме 3 "De Motu", то их анализ показывает, что «изменение движения» измеряется, по Ньютону, расстоянием между точкой, в которой находилось бы тело в некоторый момент времени при инерционном движении (т. е. движении по касательной к реальной траектории) и точкой, в которой в тот же момент времени тело реально находится под действием приложенной силы.

А поскольку определение II вводной части «Начал» гласит, что «Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе» [*Ньютон*, 1989, с. 24], то отсюда можно сделать вывод, что приложенная сила представляет собой произведение массы тела на получаемое им ускорение. Но этот вывод — некая читательская реконструкция, сам Ньютон нигде не говорит *expressis verbis*, что сила выражается произведением массы на ускорение, и соответствующей формулы, $F = ma$, не приводит[5]. Он лишь утверждает (причем на примере центростремительной силы), с одной стороны, что «движущая величина центростремительной

кривых», изданном в 1704 г., Ньютон, излагая суть своего метода флюксий, так поясняет свой подход: «Я рассматриваю здесь математические количества не как состоящие из очень малых постоянных частей, а как производимые непрерывным движением. Линии описываются и по мере описания образуются не приложением частей, а непрерывным движением точек, поверхности — движением линий, объемы — движением поверхностей, углы — вращением сторон, времена — непрерывным течением и т. д. Такое происхождение имеет место и на самом деле в природе вещей и наблюдается ежедневно при движении тел. Подобным образом древние объясняли происхождение прямоугольников, ведя подвижные прямые линии по неподвижным» [*Ньютон*, 1937, с. 167].

[5] Не говоря уже о векторной форме $F = ma$, использовать которую в то время еще не представлялось возможным.

силы есть ее мера, пропорциональная количеству движения, которое ею производится в течение данного времени» [Там же, с. 28], т. е. $F_{\text{движ}}$ ~ (количество движения), или, с учетом того, что, по Ньютону, «количество движения пропорционально скорости и массе» [Там же, с. 29], $F_{\text{движ}} \sim vm$, а с другой, что «движущая сила пропорциональна ускорительной и массе» [Там же], при том, что ускоряющая сила, по Ньютону, — это вовсе не ускорение, а сила, действующая в данном месте на массу, равную единице, т. е. $F_{\text{движ}} \sim F_{\text{уск}}m$. Видимо, Ньютон в приведенной выше цитате имел в виду, что движущая сила пропорциональна *изменению* количества движения ($F_{\text{движ}} \sim \Delta(mv)$)[6], как это и сказано в его формулировке второго закона, приведенной выше. Но как бы то ни было, ситуация с важнейшим законом механики для читателей «Начал» была отнюдь не прозрачной.

Конечно, используя записи Ньютона начала 1690-х гг., когда он намеревался коренным образом переработать «Начала» для второго издания (впоследствии, однако, отказавшись от этой мысли), а также некоторые формулировки «Начал» (включая предложения VI Книги I и X Книги II и некоторые другие), можно, как это сделано, скажем, в статье [*Pourciau*, 2011], реконструировать ход мысли Ньютона и уточнить его понимание второго закона. Но нет никаких свидетельств того, что кто-то из современников Ньютона этим занимался. Для них и «Начала» в целом, и приведенные в них общие законы часто оказывались предметом недоумения, а то и критики.

Более того, неясен был логический статус ньютонианского *lex secunda.* В «Началах» все три закона представлены как аксиомы. По мнению Б. Коэна, второй закон более похож на определение, даже если его выразить в дифференциальном виде [*Cohen*, 1970, p. 158]. А в главных трактатах и статьях по механике XVIII столетия (П. Вариньюна, К. Маклорена, Л. Эйлера, Ж. Лагранжа и др.) второй закон не цитировался и, в том виде, как он был сформулирован Ньютоном, не упоминался как фундаментальный принцип. Он использовался либо в «неявном», либо в сильно переосмысленном виде. К тому же Ньютон и континентальные математики понимали приведенную в «Началах» формулировку совершенно по-разному.

Фактически Ньютон в «Началах» и в набросках для их второго издания обобщил некоторые утверждения из трактата Х. Гюйгенса “Horologium oscillatorium” [*Huygens*, 1673]. Как показано в работах [*Pourciau*, 2011, 2020], Ньютон понимал второй закон именно как закон, позволяющий представлять перемещение тела под действием силы как сумму двух перемещений согласно правилу параллелограмма[7], и о том же много ранее писал А. Н. Крылов [*Ньютон*, 1989, с. 41–42]. Если воспользоваться рисунком Ньютона из его рукописных заметок к новому (второму) изданию «Начал» (рис. 1) и комментариями к нему, то суть дела можно представить следующим образом: пусть в некоторый момент времени t_1 тело находится в точке A, а в следующий

[6] В одной из рукописей Ньютона, относящейся к началу 1690-х гг., есть запись, которая близка к более поздней форме выражения второго закона: «Пусть y — высота или расстояние тела от центра (притяжения. — *Прим. И. Д.*). Тогда, если тело поднимается или опускается по прямой, его скорость будет $\dot{y}$, а тяжесть $\ddot{y}$, поскольку флюксия (производная. — *Прим. И. Д.*) высоты — это скорость тела, а флюксия скорости — тяжесть тела (*Et si corpus recta ascendit vel recta descendit erit velocitas ejus ẏ et gravitas ÿ. Nam altitudini fluxio est corporis velocitas et velocitatis fluxio est ut corporis gravitas*)» [Add. 3965.6, ff. 38r–39; Newton, 1967–1981, vol. 7, p. 129].

[7] Хотя он не пользовался векторными обозначениями в нашем понимании, но понятие о направленных отрезках встречается в его работах часто.

момент t_2 оно, двигаясь под действием приложенной к нему силы, переместилось в точку b. Если бы тело двигалось по инерции (прямолинейно и с постоянной по величине скоростью), то за время $\Delta t = t_2 - t_1$ оно переместилось бы из точки A в точку a. Идея Ньютона сводилась к тому, что перемещение тела из точки A в точку b можно представить как сумму двух перемещений Aa и AB[8]. В векторных обозначениях это утверждение можно сформулировать как $\mathbf{Ab} = \mathbf{Aa} + \mathbf{AB}$, при этом $ab = AB$. Приведенные выше формулировки и равенства составляют то, что в работах [*Pourciau*, 2011, 2020] получило название “The Compound Second Law, that is, the second law as it was understood by Newton”. При этом, в интерпретации Ньютона, направленный отрезок (вектор, говоря современным языком) AB представляет перемещение тела под действием приложенной к нему силы *из состояния покоя* в точке A в точку B, тогда как параллельный ему направленный отрезок ab той же длины характеризует отклонение *движущегося* тела от равномерного и прямолинейного движения под действием этой же силы. Поэтому в некоторых работах (например, [*Pourciau*, 2011, p. 1019 *et passim*]) направленный отрезок AB называют “resting deflection”, а отрезок ab — “moving deflection”, и смысл второго закона (в понимании Ньютона) сводится тогда к утверждению, что направленные отрезки, характеризующие эти два отклонения, равны по длине и параллельны. Соотносится ли это утверждение с формулировкой второго закона, приведенной в вводной части «Начал»? Полагаю, что да. Ведь если тело, двигаясь по инерции, за время Δt перемещается из точки A в точку a, а затем под действием силы — из точки a в точку b, то, согласно второму закону, это последнее перемещение должно быть пропорционально приложенной к телу силе, направленной также из точки a в точку b.

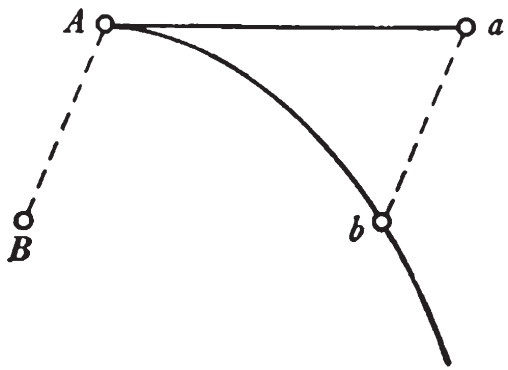

Рис. 1. Перерисованный для удобства рассмотрения чертеж из рукописных заметок И. Ньютона 1690-х гг. [Newton, 1967–1981, vol. 6, p. 538].

При подготовке второго издания «Начал» Ньютон, перебрав и отвергнув несколько новых формулировок второго закона, в итоге остановился на следующей: «Всякое новое движение, в соответствии с которым состояние тела изменяется, пропорционально приложенной движущей силе и происходит от места, которое тело в ином случае (т. е. если бы его движение не изменилось. — *Прим. И. Д.*) должно

[8] По Ньютону, если бы тело в точке A находилось в покое и на него в какой-то момент начала бы действовать сила, то тело переместилось бы за время Δt из точки A в точку B, двигаясь по отрезку AB.

было бы занимать, к тому месту, к которому направлена приложенная сила (*Motum omnem novum quo status corporis mutatur vi motrici impressa proportionalem esse, & fieri a loco quem corpus alias occuparet, in metam quam vis impressa petit*)» [Newton, 1967–1981, vol. 6, p. 538–539, n. 6].

Но в изложенном выше понимании Ньютоном второго закона ($ab = AB$) не просматривается связь между силой и вызванным ею ускорением (да и само слово «ускорение» он практически не использует[9]). И все же — можно ли из текста «Начал» «извлечь» второй закон механики в более близком нам понимании? В принципе, да, и в статье [*Pourciau*, 2011, p. 2020] показано, как это сделать. Однако все приведенные там рассуждения — не более чем модернизация ньютоновского понимания второго закона.

И еще одна грань этого понимания. Как было отмечено Б. Коэном, формулируя этот закон, Ньютон, различавший в определении IV три типа силового воздействия на тело («*ex ictu, ex pressione, ex vi centripeta* (от удара (толчка), от давления, от центростремительной силы») [*Newton*, 1871, p. 2][10]), «явно имел в виду силы удара (толчка), а не непрерывно действующие силы. Таким образом, второй закон Ньютона вполне корректно утверждал, что сила удара (толчка), т. е. мгновенно или почти мгновенно действующая сила, или, иными словами, сила, действующая в течение бесконечно малого промежутка времени, вызывает изменение в количестве движения» [*Cohen*, 2002, p. 65–66], и далее Ньютон распространил это утверждение и на силы, действующие непрерывно в течение конечного временного интервала (предложения I и IV Книги I «Начал»).

Тогда получается, что второй закон, как его формулировал Ньютон, просто сводится к утверждению, что и мгновенно, и непрерывно действующие силы вызывают изменение количества движения. Если принять такую трактовку, то сформулированный Ньютоном второй закон движения еще более отдаляется от позднейших его интерпретаций (от Л. Эйлера до наших дней) как закона, описывающего зависимость ускорения тела от равнодействующей всех приложенных к нему сил и массы тела[11].

Действительно, Ньютон исходил из того, что непрерывно действующая сила — это предел последовательности мгновенно действующих сил. Однако мгновенная сила измеряется, по Ньютону, величиной $\Delta(mv)$, тогда как непрерывно действующая сила — величиной $\Delta(mv)\Delta t$, т. е. в первом случае $F \sim \Delta(mv)$, а во втором $F \sim \Delta(mv)/\Delta t$. Сам Ньютон не видел здесь никакой проблемы, поскольку предпочитал использо-

---

[9] Комментируя выражение Ньютона «*vis centripeta quantitas acceleratrix* (ускорительная величина центростремительной силы)» [*Newton*, 1871, p. 4] из определения VII вводной части «Начал», А.Н. Крылов поясняет: «Ньютон, вводя понятие “ускорительная сила”, не пользуется понятием об ускорении, а заменяет его скоростью, производимою в продолжение заданного времени. Вообще понятие ускорения, как оно разумеется теперь, в “Началах”, не применяется, и под словом “*acceleratio*” — “ускорение” всегда разумеется приращение скорости в течение заданного конечного или бесконечно малого промежутка времени» [*Ньютон*, 1989, с. 28].

[10] В Книгах II и III «Начал» Ньютон упоминает о других силах, в частности, о силе сопротивления жидкости. Первая книга «Начал» почти исключительно посвящена теории центробежных сил.

[11] Замечу также, что аналогичное понимание вопроса можно найти в работах Р. Декарта, в частности, в «Диоптрике» (1637) [*Декарт*, 1953, с. 78–81].

вать не аналитические выражения, а геометрические построения и язык отношений (пропорций). Р. Уэстфол, известный американский историк науки, также не склонен был драматизировать ситуацию. В своей фундаментальной биографии Ньютона Уэстфол заметил мимоходом: «То, что представляло собой серьезный дефект для его [Ньютона] предшественников, для него стало, однако, не более чем легкой дымкой логической непоследовательности (*a faint haze of logical inconsistency*), которую можно было легко рассеять, не разрушая всей структуры [трактата]» [*Westfall*, 1980, p. 418]. И далее Уэстфол пояснил, что, когда дело доходило до решения конкретных задач, Ньютон вносил в свои формулировки соответствующие коррективы и все сходилось. Вполне возможно, что так оно и было. Однако, как проницательно заметил К. Трусделл, это означало, что «Ньютон начал отходить (в оригинале сказано жестче — *began to lose hold on*) от своей программы вывода всего [содержания «Начал»] математически из аксиом» [*Truesdell*, 1968, p. 89]. Иными словами, аксиоматическое построение «Начал» при ближайшем рассмотрении оказывается иллюзией. Кроме того, когда речь шла о восприятии его идей современниками и потомками, легкая дымка логической непоследовательности могла превратиться (и превратилась) в густой дым, заволакивавший понимание глубин ньютонианской мысли. Можно согласиться с оценками, приведенными в работе [*Pourciau*, 2020, p. 194, 192]: «Ньютон дал неполное определение понятия “движущая сила” и не дал никакого определения понятия “изменение движения”», в свою очередь «неопределенность в дефинициях вела к неопределенности смысла [второго] закона» [Ibid, p. 194], и «если бы Ньютон включил в “Начала” подобные (подобные приведенным выше, см. [*Newton*, 1967–1981, vol. 6, p. 538–540]. — *Прим. И. Д.*) развернутые комментарии ко второму закону движения и соответствующие рисунки, то удалось бы избежать продолжавшейся свыше трехсот лет неразберихи (*confusion*) относительно смысла этого закона» [Ibid., p. 192].

«Новый принцип» Леонарда Эйлера

В феврале 1726 г. Даниил Бернулли доложил Петербургской академии наук свою работу, посвященную проблеме сложения сил (правилу параллелограмма). Он начал с того, что механика состоит из двух частей: статики и динамики. Первая использует по необходимости «геометрические истины» и имеет априорный характер, тогда как вторая опирается на опыт и руководствуется «случайными истинами (*contingenter verae*)». В какую же категорию попадает тогда все изложенное в «Началах» Ньютона?

«Та часть механики, — подчеркивает Бернулли, — которая имеет дело с равновесием сил (*potentiae*), может быть полностью выведена из сложения и разложения сил, как было показано Пьером Вариньоном ([*Varignon*, 1725]. — *Прим. И. Д.*). Если к этому принципу мы добавим другой, согласно которому приращения скорости пропорциональны элементу времени (*elementis temporum*), умноженному на движущие силы, или давления, то мы получим вторую часть механики, которая имеет дело с движением тел» [*Bernoulli*, 1728, p. 126–127]. Этот принцип (т. е. по сути второй закон Ньютона, имя которого в этом абзаце вообще не упомянуто), по мнению Д. Бернулли, был выведен Галилеем из опытов, относящихся к свободному падению тел, и потому должен быть причислен к тому, «что обычно называют случайными истинами, в противоположность истинам необходимым (*quae dicuntur vulgo contingenter verae, quibus opponunter necessario verae*). Ведь природа может устроить так, что приращение скорости движущихся тел будет пропорционально элементу времени, умноженному на какую-либо функцию давления, и если обозначить через t время, через p — давление, а через v — скорость, то не обязательно должно быть $dv = pdt$, но может иметь место, скажем, $dv = p^2dt$ или $dv = p^3dt$ и т. д., и каждый раз будет получаться другой закон движения» [Ibid., p. 127]. Иными словами, Д. Бернулли полагал, что предложенный Ньютоном второй закон движения, вполне оправдавший себя при рассмотрении действий силы тяготения, нет никаких оснований распространять на все прочие силы[12]. Другое дело закон сложения сил (“principium compositionis virium”)! «Из него я вывожу прямое геометрическое доказательство, которое подтверждает, что теоремы статики являются в не меньшей степени необходимыми истинами, нежели теоремы геометрии (*theoremata statica non minus necessario vera esse, quam sunt geometrica*)» [Ibid.].

Из приведенных выше цитат видно также, что в решении конкретных задач прикладной механики исходные принципы геометрической статики Вариньона представлялись Д. Бернулли куда более основательными, понятными, а потому и предпочтительными, нежели второй закон Ньютона, который Бернулли, замечу, формулирует много точнее, чем это сделано в «Началах». Как справедливо было замечено в монографии [*Григорьян*, *Ковалев*, 1981, с. 73], Бернулли отводил ньютоновской механике «роль некоего методического ориентира, по которому можно дополнительно, для большей убедительности, контролировать результаты решения задачи, координировать ход мысли и т. д., но исходные принципы которой нельзя использовать в качестве отправной точки».

Л. Эйлер, которого Д. Бернулли упрекал за недостаточное почтение к ньютоновским идеям, в своей «Механике», вышедшей в Петербурге в 1736 г., спустя полвека после публикации «Начал», предпринял попытку «доказать», что «эта теорема (второй закон Ньютона. — *Прим. И. Д.*) не только правильна, но и по необходимости должна быть верной», и если бы мы предположили, что $dv = p^2dt$ или что $dv = p^3dt$ и т. п., «то мы пришли бы к противоречию. А так как Бернулли <...> все эти выражения (т. е. выражения для dv, в которые p входило в разных степенях. — *Прим. И. Д.*) рассматривал как равновероятные, то я приложил много стараний для твердых доказательств закона Ньютона» [*Эйлер*, 1938, с. 123–124]. Замечу, что второй закон для Эйлера — не аксиома, но теорема, которую надо доказывать.

О вкладе Л. Эйлера в развитие механики следует сказать особо. В отличие от многих своих предшественников и современников Эйлер рассматривал второй закон движения как важнейший принцип динамики. Но он под этим законом понимал вовсе не то, что имел в виду Ньютон. Начну с цитаты из «Механики»: «Если направление движения точки совпадает с направлением силы, то приращение скорости будет пропорционально силе, умноженной на промежуточек времени и деленной на материю или на величину точки» [Там же, с. 124]. Это положение Эйлер записал в виде дифференциального уравнения прямолинейного движения точки: $dc = npdt/A$ (где c — скорость движения точки; p — действующая на точку сила; A —

[12] Между прочим, это замечание Бернулли свидетельствует, что он не воспринимал второй закон движения ни как определение, ни как общепризнанную констатацию, основанную на опыте, как это представлял Ньютон.

масса точки; t — время; n — коэффициент, зависящий от размерности). Напомню, что в «Началах» приращение скорости везде называется «ускорением (*acceleratio*)», тогда как у Эйлера ускорение — это производная скорости по времени. Эйлер умножает обе части приведенного уравнения на дифференциал дуги траектории ds и получает следующую формулу: $cdc = npds/A$. Этой формуле он придавал особое значение, ибо она «охватывает все установленные до сих пор принципы, определяющие природу и все законы движения, если только направление силы совпадает с направлением движения» [Там же, с. 126].

Но наибольший интерес в контексте обсуждаемой темы представляет статья Л. Эйлера, представленная им Берлинской академии наук 3 сентября 1750 г. (опубликована в 1752 г.) с весьма выразительным и значимым названием: «Открытие нового принципа механики» [*Euler*, 1752][13]. О каком «новом» принципе механики шла речь? Как ни удивительно, но Эйлер, хорошо знавший текст «Начал», имел в виду то, что принято называть вторым законом Ньютона.

Эйлер записывает этот закон в виде трех уравнений (для каждой компоненты в декартовой системе координат): $2Mddx = Pdt^2$; $2Mddy = Qdt^2$; $2Mddz = Rdt^2$, где P, Q, R — компоненты силы, действующей на тело массы M (в современных обозначениях соответственно: F_x, F_y и F_z) [Ibid., p. 196][14]. И далее следует важное замечание, суть которого сводится к тому, что если на тело не действует никакая сила (т. е. $P = Q = R = 0$), то справедливы следующие выражения: $Mdx = Adt$; $Mdy = Bdt$ и $Mdz = Cdt$, где A, B, и C — константы. Т. е. тело в этом случае движется прямолинейно и равномерно. «Таким образом, — пишет Эйлер, — эти формулы ($Mdx = Adt$ и т. д. — *Прим. И. Д.*) содержат в себе первый закон движения» [Ibid.]. Ясно, что слова «первый закон движения» являются косвенной ссылкой на соответствующее место в вводной части «Начал». Получается, что первый закон Ньютона Эйлер «замечает», но видеть в формулах $2Mddx = Pdt^2$ и т. д. второй закон он отказывается, считая полученный результат «новым принципом механики», которого у Ньютона не было. И у Эйлера были на то веские основания.

Дело не только в отмеченных выше неясностях ньютоновой формулировки второго закона. Как бы предвидя возможное возражение (мол, это все уже было сформулировано в «Началах»), Эйлер поясняет: «наши формулы не ограничиваются этим великим законом (т. е. первым законом движения. — *Прим. И. Д.*), но содержат кроме того законы, описывающие действие на тело произвольных сил. Следовательно, принцип, который я установил, включает в себя все начала, позволяющие определить движение всех тел, какова бы ни была их природа» [Ibid., p. 197]. Более того, Эйлер ставит перед собой задачу вывести из этого «нового принципа» «все правила, которые будут нам необходимы для определения движения твердого тела, чьи оси вращения не остаются неподвижными» [Ibid., p. 197][15].

---

13 Возможно, толчком к этой работе Эйлера стали исследования 1740-х гг. Даламбера и И. Бернулли по теории колебания струны.

14 О причине появления множителя «2» см.: [*Dias*, 2017].

15 Если ограничиться только формальной стороной вопроса, то скалярная форма второго закона для случая одномерного движения частицы единичной массы была дана Вариньоном ($y = dv/dt$, где y — сила) [Varignon, 1703, p. 23], а в более общей форме Я. Германом ($G = MdV : dT$, где G — сила) [Hermann, 1716, p. 56]. К концу 1720-х гг. дифференциальная форма второго закона была известна практически всем, кто занимался механикой.

Можно только удивляться тому, что понадобилось более шестидесяти лет после публикации «Начал», чтобы прийти к ясному пониманию второго закона движения. Видимо, прав был К. Трусделл: «как часто случается в истории науки, труднее всего найти простую идею; простота не приходит сама, она должна быть создана (*simplicity does not come of itself but must be created*)» [*Truesdell*, 1960, p. 251].

Здесь уместно процитировать слова Эйлера из предисловия к «Механике», где он ясно сформулировал свое отношение к «Началам» Ньютона. «Я не знаю, — пишет Эйлер, — вышла ли в свет какая-либо другая работа, кроме “Форономии” Германа, в которой <…> учение о движении было бы разобрано совершенно отдельно и обогащено столь многими блестящими вновь открытыми положениями. Герман и сам внес в эту науку много нового; вместе с тем он добавил и собрал здесь все то, что за это время (т. е. между 1687 и 1716 гг. — *Прим. И. Д.*) было открыто стараниями других ученых. Но так как он хотел охватить в этом не очень большом труде кроме механики еще и другие смежные науки, а именно статику и гидростатику вместе с гидравликой, то ему оставалось очень мало места для изложения механики; вследствие этого все то, что касается этой науки, он принужден был изложить в краткой и отрывистой форме. Кроме того, — что особенно мешает читателю, — все это он провел по обычаю древних при помощи синтетически геометрических доказательств и не применил (*celavit*) анализ, благодаря которому *только и можно достигнуть полного понимания* (*qua ad completam harum rerum cognitionem pervenitur*; выделено мной. — *Прим. И. Д.*) этих вещей. Приблизительно так же написана работа И. Ньютона “Математические начала натуральной философии”, благодаря которой наука о движении получила наибольшее развитие.

Однако если анализ где-либо и необходим, так это особенно относится к механике. Хотя читатель и убеждается в истине выставленных предложений, но он не получает достаточно *ясного и точного их понимания* (*non satis claram et distinctam eorum cognitionem assequatur*; выделено мной. — *Прим. И. Д.*), так что, если чуть-чуть изменить те же самые вопросы, он едва ли будет в состоянии разрешить их самостоятельно, если не прибегнет сам к анализу и те же предложения не разрешит аналитическим методом. Это как раз случилось со мной, когда я начал знакомиться с “Началами” Ньютона и “Форономией” Германа[16]. Хотя мне казалось, что я достаточно ясно понял решение многих задач, однако задач, чуть отступающих от них, я уже решить не мог. И вот тогда-то я попытался, насколько умел, выделить анализ из этого синтетического метода и те же предложения для собственной пользы проработать аналитически; благодаря этому я значительно лучше понял суть вопроса» [*Эйлер*, 1938, с. 33–34; *Euler*, 1736, Praefatio, s. p.].

Эйлер в этом фрагменте акцентирует два обстоятельства: 1) переход от геометрического к аналитическому языку — это не просто вопрос формы изложения, это вопрос *понимания* сути выдвигаемых утверждений и доказательств; «Началам» не хватало не только аналитического языка дифференциального и интегрального исчислений, но и существенных *содержательных* аспектов, в первую очередь ясного понимания второго закона, для чего, в свою очередь, требовалось выработать ясное понимание концепций ускорения и количества движения; 2) геометрический

[16] Здесь Эйлер не вполне справедлив по отношению к Я. Герману, который не только систематически изложил механику Ньютона, но и использовал наряду с геометрическим методом язык дифференциального и интегрального исчислений Лейбница. — *Прим. И. Д.*

подход, использованный Ньютоном, не позволяет охватить весь круг задач механики. Эйлер коренным образом меняет ситуацию: его цель — разработка общих аналитических методов описания движения, которые можно было бы применять к широкому кругу задач, а не придумывать для каждого типа задач свой изощренный геометрический подход, как это делал Ньютон. При этом Эйлер не отказывался полностью от геометрических образов, но они в его рассуждениях играли подчиненную роль. Именно в трактате Эйлера 1736 г. механика была сформулирована на том языке, который стал для нее естественным начиная с середины XVIII столетия и который позволил распространить ее на новые задачи: вращение твердого тела вокруг оси (неподвижной и мгновенной), движение тела в сопротивляющейся среде и т. д. Вообще для XVIII в. характерны поиски общих, — причем не соотносящихся напрямую с «Началами» и более общих, чем ньютоновские, — принципов механики, в результате чего были открыты принципы возможных перемещений в статике, принцип Даламбера и принцип наименьшего действия Мопертюи–Эйлера в динамике.

Возвращаясь к статье Эйлера 1752 г. [*Euler*, 1752], отмечу, что ее новизну следует рассматривать в очерченном выше контексте. Хотя предложенное в ней математическое выражение второго закона движения сегодня выглядит настолько естественным, что мы склонны вычитывать этот закон в «Началах» Ньютона, однако историческая картина выглядит несколько иначе. В начале XVIII в. этот закон в наиболее значимых работах по механике либо вообще отсутствует, либо ему отведена сугубо второстепенная роль. Новизна подхода Эйлера состоит не только (и даже не столько) в том, что он сформулировал второй закон в дифференциальной форме, но в том, что он первым осознал его применимость как к динамике материальной точки, так и к изучению движения твердых тел, а также к механике сплошных сред. Только представленная в аналитической форме механика могла оказывать глубокое влияние на всю физику.

Между геометрией и флюксиями

Следует также сказать о предпочтении, которое Ньютон в «Началах» отдавал геометрическому методу решения задач механики. Вопрос не сводится к чисто стилистическому выбору и уважению к традиции древних авторов. Геометрические доказательства, по убеждению Ньютона, обладали высокой степенью наглядности и достоверности. Однако геометрический метод изложения механических проблем, представленный в «Началах», делал этот трактат трудным даже для самых математически подготовленных читателей.

Кроме того, известная полемика между Ньютоном и Лейбницем по поводу создания математического анализа имела не только приоритетную грань. Ньютон постоянно подчеркивал, что его метод флюксий имеет существенные преимущества перед *calculus differentialis* Лейбница. По мнению Ньютона, исчисление Лейбница представляло собой эвристический прием, основанный на манипуляциях с символами, а потому лишенный научного характера, тогда как метод флюксий имел глубокие корни в геометрии и в самой природе вещей.

Лейбниц, действительно, делал акцент на том, что до него «никому не приходило в голову построить алгоритм некоторого нового исчисления, с помощью которого можно было бы освободить воображение от вечного внимания к фигурам» [*Leibniz*, 1858, S. 393]. Разумеется, метод Лейбница отличался общностью и, как правило, большей (по сравнению с геометрическим подходом) простотой. Достаточно сравнить «молниеносный вывод» [Юшкевич, 1948, с. 160] $d(x^n)$ (а также $\int x^n dx$) по методу Лейбница, — благодаря тому, что «в этом исчислении с x и dx обращаются совершенно так же, как с y и dy или какой-нибудь иной неопределенной буквой и ее дифференциалом» [Лейбниц, 1948, с. 167], — с громоздкими вычислениями квадратур парабол и гипербол различных порядков.

Кроме того, геометрический подход Ньютона был во многом необычен для современников, отчасти потому, что неявно включал в себя непривычные им идеи инфинитезимального исчисления (некоторые историки даже писали, что Ньютон использовал "*a geometric form of the differential and integral calculus*" [*Caparrini, Fraser*, 2013, p. 358], что, разумеется, имеет свои резоны), а отчасти потому, что изложение Ньютона иногда было чрезмерно лапидарным и потому неясным[17].

Ньютон, отвечая Лейбницу и Иоганну Бернулли, разъяснял, что в действительности использовал аналитический метод рядов и флюксий (т. е. «новый анализ») практически во всех разделах своей работы, но по двум причинам делал это, так сказать, неявным образом:

— его сочинение было адресовано аудитории, которая еще не была готова использовать столь непривычный математический язык, а представлять новую науку о движении и новую космологию, используя незнакомый большинству читателей математический метод, было непозволительно;
— он, следуя методе древних авторов, выбрал геометрический метод доказательства своих положений с целью придания утверждениям натуральной философии большей математической достоверности, добавив, что большинство своих результатов он первоначально получил с помощью нового анализа.

Г. Цейтен добавляет еще одну причину: Ньютон «не хотел ставить в зависимость от этого (аналитического. — *Прим. И. Д.*) метода доказательства своих механических предложений» [*Цейтен*, 1938, с. 400].

Разумеется, в 1687 г. выбор геометрического языка в сочинении, посвященном математизации натурфилософии, представлялся наиболее естественным. Труды Галилея и Гюйгенса были написаны в геометрической форме. Однако к концу XVII столетия термин «геометрия» стал столь же неоднозначным, как и термин "*calculus*". Те, кто дал себе труд внимательно прочитать «Начала», обнаружили, что геометрия Ньютона была весьма далека от привычной евклидовой[18]. В работах Ньютона (в том числе и в «Началах») геометрические фигуры генерировались непрерывным движением точки. Автор то и дело обращается к таким понятиям, как «пределы отноше-

[17] Кроме того, не следует забывать, что Ньютон использовал в «Началах» множество математических методов: элементы проективной геометрии (разделы 4 и 5 первой книги), геометрический предел исчезающих величин (Положения 1, 6 и 11–13 Книги I), разложения в ряд (Положение 45 Книги I и Положение 10 Книги II), алгебраические уравнения (Положение 30 Книги I); квадратуры для криволинейных фигур (следствие 3 к Положению 41 и следствие 2 к Положению 91 Книги I); расчет радиусов кривизны (Положение 28 Книги III).

[18] К этому надо добавить, что многие доказательства и математические детали Ньютон просто опускал.

ний и сумм исчезающих величин» и т. п., что явно выходило за рамки евклидового канона. Все это затрудняло восприятие текста «Начал», и в итоге, удобства символики и алгоритмичность лейбницеанского *calculus* получили куда большее признание современников, нежели геометрический подход Ньютона. Причем не только многие математики на континенте (Лейбниц, И. Бернулли и П. Вариньон) пошли по пути использования *calculus* в теоретической механике, но и математики круга Ньютона (Д. Грегори, Р. Коутс, Б. Тейлор, Д. Стирлинг и А. де Муавр) обращались к методу рядов и флюксий при описании движущихся тел, в том числе и при движении в тех или иных средах. Если «Начала» создавались с учетом математического кругозора читателей 1680-х гг., то к 1700 г. компетенции европейских математиков заметно изменились, и математический стиль Ньютона к тому времени уже устарел и никакой *парадигмы* аналитической механики на этой основе создать было невозможно.

Разумеется, Ньютон мог изложить свой метод флюксий и его применение хотя бы к некоторым задачам механики в специальном приложении к основному тексту «Начал». Он действительно рассматривал такую возможность в 1690-х гг., когда готовил второе издание трактата. Но в итоге, и во втором (1713), и третьем (1726) изданиях изложение велось на геометрическом языке, и эта «геометрическая завеса» скрывала то, что в XVIII столетии и позднее казалось математически более интересным.

Как писал Ньютон в конце 1710-х гг., «математикам нынешнего века, которые хорошо (*fere toti versantur*) разбираются в алгебре, этот синтетический (геометрический. — *Прим. И. Д.*) стиль [«Начал»] менее близок, поскольку может показаться им слишком нудным и многословным, слишком похожим на метод древних, или же потому, что этот метод недостаточно раскрывает способ открытия (*rationem inveniendi minus patefaciat*). Конечно же, я мог выразить аналитически то, к чему пришел аналитически, причем с меньшими усилиями, чем мне потребовались для написания этого труда. Но я писал для философов, погруженных в начала геометрии, и излагал геометрически основы натурфилософии (*Philosophiae naturalis fundamenta Geometrice demonstrata ponebam*). А геометрические находки, которые не касались астрономии и физики, я либо полностью опускал, либо упоминал о них вскользь» [*Newton*, 1967–1981, vol. 8, p. 450]. Но дело не только в том, что геометрический стиль в работах, посвященных механике, на рубеже XVII и XVIII вв. стал выходить из моды, уступая место математическому анализу. Новому поколению математиков, сформировавшемуся в школе Иоганна Бернулли в Париже и Базеле и изучавшему высшую математику по учебнику Лопиталя “Analyse des Infiniment Petits” (1696), «Начала» Ньютона казались темными и непонятными. А после работ Л. Эйлера и Ж. Лагранжа математические методы «Начал» «ушли в прошлое и практически вышли из употребления» [*Guicciardini*, 1999, p. 6].

Бархатная революция в науке века Просвещения

Вслед за публикацией первого издания «Начал» интерес к этому сочинению Ньютона после некоторой паузы, последовавшей после первых рецензий 1688 г. и растянувшейся минимум на два десятилетия, стал расти, причем даже среди тех, кто по причине недостатка математического образования не мог разобраться в сути ньютоновских рассуждений и ограничивался фрагментарным чтением и мнением математиков (подробнее см.: [*Feingold*, 2004]).

Вместе с тем, в начале XVIII в. появился ряд *hautes vulgarisations*, из которых наиболее удачным примером стала книга Г. Пембертона (1728), помогавшего Ньютону готовить третье издание «Начал» (1726) [*Pemberton*, 1728]. Пембертон, не отходя от ньютонианской манеры геометрического изложения, старался пересказать содержание «Начал» в полном объеме и более понятным языком, что ему отчасти удалось. Однако со временем акценты в оценке «Начал» стали смещаться: в перечислении научных заслуг Ньютона особо подчеркивалось открытие им закона всемирного тяготения и его теория движения планет. Именно это открытие и обсуждавшийся Ньютоном круг проблем, с ним связанных, вызывали наибольшие восторги и жесткую критику, что не удивительно, поскольку, как справедливо заметил Т. Кун, «“Начала” были предназначены главным образом для решения проблем небесной механики» [Кун, 1975, с. 51], а механика Ньютона — это прежде всего теория центральных сил, и именно в области «небесной» механики» он сумел получить наиболее впечатляющие результаты. Более того, можно согласиться с И.Б. Погребысским и Л.С. Фрейманом, что «в первые десятилетия после появления “Начал” Ньютона механика развивается в значительной мере независимо от них. До середины XVIII в. наибольшее влияние оказывает не система механики “Начал”, а изложенная в них теория тяготения» [*Погребысский*, *Фрейман*, 1971, с. 122]. Для того чтобы добиться прогресса в «земной» механике, необходимо было проделать огромную работу. Она была выполнена, главным образом, учеными континентальной Европы, фактически заново выстроившими здание новой, аналитической механики и создавшими новую парадигму (причем не только для собственно механики, но и, как минимум, для физики вообще), ставшую результатом *Quiet Scientific Revolution* XVIII столетия, сопоставимую по своей значимости с созданием квантовой механики[19]. Можно, конечно, сказать, что здание аналитической механики было построено на ньютоновском фундаменте, поскольку Ньютон сформулировал три основных закона механики. Но, учитывая сказанное выше, следует признать, что второй закон (важнейший в системе ньютоновских аксиом) фактически принимает адекватную форму ($F = ma$), только когда попадает в матрицу динамических понятий Л. Эйлера *et al*. Сам Ньютон ничего подобного, как мы видели, не писал, его система представлений была несколько иной. Можно, конечно, говорить о «ньютонианской парадигме», о «ньютонианской революции» (результатом которой стало установление указанной парадигмы), но только если рассматривать «Начала» в пост-эйлерианских или (еще лучше) в пост-лагранжеанских терминах, вычитывая в тексте этого сочинения все, что входит в учебники физики, начиная с XIX столетия. Но в чем же тогда вклад Ньютона в эту парадигму? Я остановлюсь далее только на методологической грани вопроса, поскольку новаторским достижениям Ньютона в физике и математике посвящена громадная литература (см., например, монографию: [*Westfall*, 1980]).

«Начала» воспринимались по-разному. В краткой, около 300 слов, анонимной рецензии, опубликованной в августе 1688 г. в *Journal des Sçavants*, книга была оценена весьма высоко (как «наисовершеннейшая работа по механике, которую только можно представить»), но вместе с тем отмечалось, что доказательства и определения

---

[19] Иногда в литературе используется термин “analytic revolution” (см., например, [*Caparrini*, *Fraser*, 2013, p. 359].

Ньютона «могут рассматриваться лишь как механические», ведь и сам автор (т. е. Ньютон) «допускает, что он трактует свои принципы не как физик (*Physicien*), но просто как геометр (*Géomètre*). <...> Он предлагает гипотезы <...>, которые в большинстве своем являются произвольными (*la plupart arbitraires*) и которые могут служить основанием лишь для трактата по чистой механике (*un traité de pure Mécanique*). <...> А чтобы создать сочинение в высшей степени совершенное, месье Ньютон должен представить нам физику, столь же точную, как механика. Это будет достигнуто, если он заменит истинными движениями те, которые он предположил» [Anon., 1688].

Сказанное рецензентом (возможно, им был философ-картезианец Пьер Сильвен Режи) означало, что Ньютон не предложил никаких каузальных объяснений природных явлений типа картезианской теории вихрей. Здесь сказалось глубинное различие между Ньютоном и Декартом: первый предлагал читателю математически сконструированную рациональную механику, которая позволяла проводить вычисления (например, рассчитывать положения планет) и сопоставлять их с экспериментом и наблюдениями, тогда как второй искал общие физические принципы, ясные и отчетливые, на которых можно было построить общую картину природы. Конструктивный прагматизм Ньютона оценили не сразу, но постепенно «к загадочному тяготению стали привыкать» и «привыкали тем основательнее, чем больше (и, добавлю, успешней. — *Прим. И. Д.*) вычисляли» [*Погребысский*, *Фрейман*, 1971, с. 122]. Феномен «привыкания» научного сообщества к теории с эффективно работающим аппаратом (математическим, таксономическим и т. д.) неоднократно давал о себе знать впоследствии в истории науки, когда в периоды становления новой парадигмы ее основатели в разных формах повторяли, соответствующим образом перефразируя, методологическое кредо Ньютона: «довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря» [*Ньютон*, 1989, с. 662].

Но если принять такую методологическую установку, то вопрос о выборе математического аппарата, позволяющего с единых позиций решать широкий (если не весь наличный в данное время) круг задач некоторой математизированной дисциплины, выходит на первое место. И в этой ситуации уже нельзя сказать, что, к примеру, Эйлер и другие ученые континентальной Европы просто *развивали* ньютонианскую парадигму. Нет, они — с ньютонианских позиций конструктивного прагматизма — *создавали* парадигму аналитической механики. Ведь если, согласно Куну, под парадигмой понимать общепризнанные образцы решения научных проблем, то «Начала», как было показано выше, таких образцов не дали. И фраза Куна — «ученые решают головоломки, моделируя их на прежних решениях головоломок» [*Кун*, 1975, с. 239], — к описанной в этой статье ситуации никак отнесена быть не может, поскольку ни Эйлер, ни Даламбер, ни Лагранж, хотя, разумеется, и использовали в необходимых случаях закон всемирного тяготения, однако, решая «головоломки» аналитической механики, ничего по ньютоновым «Началам» не моделировали.

Если ограничиться тематическими рамками «Начал», то главная заслуга Ньютона — это открытие закона всемирного тяготения и применение его к описанию движения планет и комет, а также понимание механики как основы, а точнее, модели математического исследования природы. То же, что сегодня называется «механикой Ньютона», представляет собой учение, созданное путем глубокой трансформации и переформулировки теории, представленной английским ученым, и совершенно отличное от последней. Пожалуй, главная заслуга в этом деле принадлежит Л. Эйлеру, который и стал, по сути, создателем новой парадигмы, именуемой ныне — в знак уважения к интеллектуальному подвигу первопроходца — «ньютонианской».

Можно согласиться с оценкой П. Гвиччардини: «Математизация многих проблем, преждевременно (*prematurely*) поставленных Ньютоном в “Началах”, стала возможной (например, в теории движения Луны, разработанной Эйлером, Клеро и Даламбером в 1750-х гг.) благодаря исчислению, которое было и не лейбницеанским, и не ньютонианским, и которое лучше было бы назвать “*Eulerian calculus*”» [*Guicciardini*, 1999, p. 259]. Гвиччардини особо подчеркивает, что континентальные математики XVIII столетия (прежде всего Эйлер, Клеро и Даламбер) сумели глубоко изменить сам *calculus*, благодаря анализу понятия функции и производной, уделив особое внимание функциям нескольких переменных, частным производным и дифференциальным уравнениям в частных производных и вариационным методам, что позволило обратиться к задачам механики сплошных сред и механики твердого тела. Фактически в XVIII столетии была создана механика, основанная на математических методах, *альтернативных* прямому применению законов Ньютона, да и сами эти законы были сформулированы в адекватном виде. Узловым событием этой истории стала публикация «Аналитической механики» Ж.Л. Лагранжа в 1788 г., спустя 100 лет после публикации «Начал». Да, это была «тихая» (или, в определенном смысле, «бархатная») революция. Она не сопровождалась громкой философской и натурфилософской полемикой и приоритетными спорами; это была в основном спокойная кабинетная работа, о которой ни Вольтер, ни мадам дю Шатле не писали, да и осознание ее именно как научной революции пришло позднее, задним числом, *post hoc*.

При всей значимости «Начал» некоторые их, мягко выражаясь, особенности (непроработанность аксиоматики, расплывчатость в формулировке второго закона, опора на «геометрический суррогат флюксионного исчисления» [*Вавилов*, 1989, с. 124], отсутствие единого математического подхода к решению механических задач, невозможность распространения геометризованной механики на многие классы задач динамики, отличные от тех, которые рассматривал сам Ньютон, и т. д.) препятствовали не только восприятию, но и развитию ньютоновых идей.

Ученым XVIII в. фактически пришлось строить здание «рациональной механики» почти с нуля. И это направление их работ было полностью независимым от Ньютона.

Литература

Вавилов С.И. Исаак Ньютон (1643–1727). 4-е изд., доп. М.: Наука, 1989. 271 с.

Григорьян А.Т., Ковалев Б.Д. Даниил Бернулли, 1700–1782. М.: Наука, 1981. 320 с.

Декарт Р. Диоптрика // *Декарт Р.* Рассуждение о методе. С приложениями: Диоптрика, Метеоры, Геометрия / Ред., пер., ст. и комм. Г.Г. Слюсарева, А.П. Юшкевича. М.: Изд-во АН СССР, 1953 (Серия «Классики науки»). С. 69–190.

Кун Т. Структура научных революций / Пер. с англ. И.З. Налетова; общ. ред. и послесл. С.Р. Микулинского, Л.А. Марковой. М.: Прогресс, 1975. 287 с.

Лейбниц Г. Избранные отрывки из математических сочинений (перевод и редакция А.П. Юшкевича) // Успехи математических наук. 1948. Т. 3. Вып. 1 (23). С. 165–204.

Ньютон И. Рассуждение о квадратурах // *Ньютон И.* Математические работы / Пер. с лат., вводн. ст. и комм. Д.Д. Мордухай-Болтовского. М.; Л.: ОНТИ, 1937 (Серия «Классики естествознания»). С. 167–193.

Ньютон И. Математические начала натуральной философии (*Philosophia naturalis principia matematica*) / Пер. с лат. и прим. А.Н. Крылова; Предисл. Л.С. Полака. М.: Наука, 1989. 688 с.

Погребысский И.Б., Фрейман Л.С. Аналитическая механика (XVIII в.) // История механики с древнейших времен до конца XVIII века / Под общ. ред. А.Т. Григорьяна, И.Б. Погребысского. М.: Наука, 1971. С. 122–157.

Цейтен Г.Г. История математики в XVI и XVII веках / Пер. с нем. П. Новикова; обработка, прим. и предисл. М. Выгодского. М.; Л.: ОНТИ, 1938. 470 с.

Эйлер Л. Основы динамики точки. Первые главы из «Механики» и из «Теории движения твердых тел». М.; Л.: ОНТИ, 1938. 500 с.

Юшкевич А.П. Лейбниц и основание исчисления бесконечно малых // Успехи математических наук. 1948. Т. 3. Вып. 1 (23). С. 150–164.

[Anon.]. Journal des Sçavans. 1688. 2 Août. T. 10. P. 237–238.

Bernoulli D. Examen principiorum mechanicae et demonstrationes geometricae de compositione et resolutione virium // Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae, (1726). 1728. Vol. 1. S. 126–141.

Caparrini S., Fraser C. Mechanics in the Eighteenth Century // Oxford Handbook of History of Physics / Eds. J. Buchwald, R. Fox. Oxford: Oxford University Press, 2013. P. 358–405.

Cohen I.B. Newton’s Second Law and the Concept of Force in the *Principia* // The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton (1666–1966) / Ed. R. Palter. The MIT Press, Cambridge, 1970. P. 143–191.

Cohen I.B. Newton’s Concepts of Force and Mass, with Notes on the Laws of Motion // The Cambridge Companion to Newton / Ed. I. Bernard Cohen, George E. Smith. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. P. 57–84.

Dias P.M.C. Leonhard Euler’s “Principle of Mechanics” (an Essay on the Foundations of the Equations of Motion) // Revista Brasileira de Ensino de Fisica. 2017. Vol. 39. № 4. P. e4601-1–e4601-8.

Euler L. Mechanica sive motus scientia analytice exposita. Auctore Leonhardo Eulero academiae imper. scientiarum membro et matheseos sublimioris professore. T. I. Instar supplementi ad commentar. acad. scient. imper. Petropoli. Ex typographia Academiae scientarum, 1736. 480 p.

Euler L. Decouverte d’un nouveau principe de Mecanique [1750] // Memoire de l’Academie Royale des Sciences et des Lettres de Berlin. 1752. T. 6. P. 185–217.

Feingold M. The Newtonian Moment, Isaac Newton and the Making of Modern Culture. New York, Oxford: Oxford University Press, 2004. 218 p.

Guicciardini N. Isaac Newton on Mathematical Certainty and Method. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2009. 422 p.

Guicciardini N. Reading the Principia: The Debate on Newton’s Mathematical Methods for Natural Philosophy from 1687 to 1736. Cambridge: Cambridge University press, 1999. 285 p.

Hermann J. Phoronomia, Sive de Viribus et Motibus Corporum Solidorum et Fluidorum, Libri Duo. Amsterdam: R. & G. Wetstenios, 1716. 401 p.

Huygens Chr. Horologium Oscillatorium: sive de motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae. Parisii: apud F. Muguet, 1673. 161 p.

Jammer M. Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics. Mineola: Dover Publications, Inc., 1999. 269 p.

Leibniz G.W. Historia et origo calculi differentialis (1714) // *Leibniz G.W.* Mathematische Schriften: In 7 Bdn. / Hrsg. von C.I. Gerhardt. Berlin; Halle, 1849–1863. Bd. 5 (1858). S. 392–410.

Newton I. Philosophiae naturalis principia mathematica. Londini: Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater; prostat apud plures Bibliopolas, 1687. 510 p.

Newton I. Principia / Repr. for Sir William Thomson and Hugh Blackburn. Glasgow: James Maclehose, publisher to the University; printed by Robert Maclehose, 1871. 538 p.

Newton I. The Mathematical Papers: In 8 vols. / Transl. and ed. D.T. Whiteside. Cambridge: Cambridge University Press, 1967–1981.

Pemberton H. A View of Sir Isaac Newton's Philosophy. London: Palmer, 1728. 407 p.

Pourciau B. Is Newton's Second Law Really Newton's? // American Journal of Physics. 2011. Vol. 79. № 10. P. 1015–1022.

Pourciau B. The Principia's Second Law (as Newton Understood it) from Galileo to Laplace // Archive for History of Exact Sciences. 2020. Vol. 74. Iss. 3. P. 183–242.

Truesdell C. The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies 1638–1788. Introduction to Leonhardi Euleri *Opera Omnia*, Series II, Vol. 10 and 11. Zürich: Orell Füssli, 1960. 435 p.

Truesdell C. Essays in the History of Mechanics. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 1968. 383 p.

Varignon P. Manière générale de déterminer les forces, les vitesses,les espaces et les temps, une seule de ces quatre chosesétant donnée dans toutes sortes de mouvementsrectilignes variés à discretion // Mémoires de mathématique et de physique de l'Académie royale des sciences (1700). 1703. T. 2. P. 22–27.

Varignon P. Nouvelle Mécanique ou Statique dont le projet fut donné MDCLXXXVII. Ouvrage posthume de M. Varignon, des Académies Royales des Sciences de France, d'Angleterre et de Prusse, lecteur du Roy en philosophie au College royal, et professeur des mathématiques au College Mazarin. Paris: Claude Jombert, 1725. 387 p.

Westfall R.S. Never at Rest. A Biography of Isaac Newton. Cambridge: Cambridge University press, 1980. 910 p.

Wilczek F. Whence the Force of F = ma? I: Culture Shock // Physics Today. 2004. Vol. 57. № 10. P. 11–12.

Continental Paradigm of Island Science (Who Became the Creator of "Newtonian Science"?)

Igor S. Dmitriev

Institute of Human Philosophy,
Herzen State Pedagogical University of Russia,
St Petersburg, Russia;
e-mail: isdmitriev@gmail.com

The article shows that the concept of "Newtonian paradigm", widespread in the literature on the history and philosophy of science, the formation of which is associated with the publication of the treatise by I. Newton "The Mathematical Principles of Natural Philosophy" (1687), has no historical meaning. For all the importance of this work of Newton, it could not be laid the foundation of a new paradigm for at least two reasons: the lack of a clear and correct formulation of the second law of mechanics and the author's choice of a geometric way of presenting material and demonstrations. In fact, a new paradigm of analytical mechanics was formed in the XVIII century on the continent by the efforts of such scientists as I. and D. Bernoulli, L. Euler, A. Clairaut, J. D'Alembert, L. Lagrange and others. In addition, from the above analysis it follows that the so-called "scientific revolution" of The Early Modern period took place in two stages: the natural-philosophical stage (XVI–XVII centuries) and the scientific stage itself (XVIII century).

Keywords: I. Newton, L. Euler, second law of mechanics, differential calculus, scientific revolution.

Acknowledgment

The research was carried out with support from the Russian Foundation of Basic Research (RFBR) according to the research grant No. 18-011-00920a "Revolutionary Transformations in Science as a Factor of Innovation Processes: Conceptual and Historical Analysis".

References

[Anon.] (1688). *Journal des Sçavans*, 2 Août. *10*, 237–238 (in French).

Bernoulli, D. (1728). Examen principiorum mechanicae et demonstrationes geometricae de compositione et resolutione virium. *Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae*, *1*, 126–141 (in Latin).

Caparrini, S., Fraser, C. (2013). Mechanics in the Eighteenth Century. In J. Buchwald & R. Fox (Eds.), *Oxford Handbook of History of Physics* (pp. 358–405). Oxford, England: Oxford University Press.

Cohen, I.B. (1970). Newton's Second Law and the Concept of Force in the Principia. In R. Palter (Ed.), *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton (1666–1966)* (pp. 143–191). Cambridge, USA: The MIT Press.

Cohen, I.B. (2002). Newton's Concepts of Force and Mass, with Notes on the Laws of Motion. In I. Bernard Cohen & George E. Smith (Eds.), *The Cambridge Companion to Newton* (pp. 57–84). Cambridge, England: Cambridge University press.

Descartes, R. (1953). *Rassuzhdeniye o metode. S prilozheniyami: Dioptrika, Meteory, Geometriya* [Discourse on the method. With applications: Dioptric, Meteors, Geometry]. Moskva: Izd-vo AN SSSR (in Russian).

Dias, P.M.C. (2017). Leonhard Euler's "Principle of Mechanics" (an Essay on the Foundations of the Equations of Motion). *Revista Brasileira de Ensino de Fisica*, *39* (4), 1–8.

Euler, L. (1736). *Mechanica sive motus scientia analytice exposita. Auctore Leonhardo Eulero academiae imper. scientiarum membro et matheseos sublimioris professore. T.I. Instar supplementi ad commentar. acad. scient. imper. Petropoli*. SPb.: Ex typographia Academiae scientarum (in Latin).

Euler, L. (1752). Decouverte d'un nouveau principe de Mecanique [1750]. *Memoire de l'Academie Royale des Sciences et des Lettres de Berlin*, *6*, 185–217 (in French).

Feingold, M. (2004). *The Newtonian Moment, Isaac Newton and the Making of Modern Culture*. New York, USA: Oxford University Press.

Grigoyan, A., Kovalev, B. (1981). *Daniel' Bernulli, 1700–1782* [Daniel Bernoulli, 1700–1782]. Moskva: Nauka (in Russian).

Guicciardini, N. (1999). *Reading the Principia: The Debate on Newton's Mathematical Methods for Natural Philosophy from 1687 to 1736*. Cambridge, England: Cambridge University press.

Guicciardini, N. (2009). *Isaac Newton on Mathematical Certainty and Method*. Cambridge, Massachusetts, USA: The MIT Press.

Hermann, J. (1716). *Phoronomia, sive De viribus et motibus corporum solidorum et fluidorum, Libri duo*. Amsterdam, Holland: R. & G. Wetstenios (in Latin).

Huygens, Chr. (1673). *Horologium Oscillatorium: sive De motu pendulorum ad horologia aptato demonstrationes geometricae*. Parisii: apud F. Muguet (in Latin).

Jammer, M. (1999). *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics*. Mineola, USA: Dover Publications, Inc.

Kuhn, T. (1975). *Struktura nauchnykh revolyutsiy* [The Structure of Scientific Revolutions]. Moskva: Progress (in Russian).

Leibniz, G.W. (1858). Historia et origo calculi differentialis (1714). In C.I. Gerhardt (Ed.), Leibniz G.W. Mathematische Schriften. In 7 Bdn. Bd. 5 (392–410). Berlin–Halle: H.W. Schmidt (in Latin).

Leibniz, G. (1948). Izbrannyye otryvki iz matematicheskikh sochineniy [Selected Excerpts from mathematical works]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, *1* (23), 165–204 (in Russian).

Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londini: Jussu Societatis Regiae ac Typis Josephi Streater; prostat apud plures Bibliopolas (in Latin).

Newton, I. (1871). *Principia*. Glasgow: James Maclehose.

Newton, I. (1937). *Matematicheskiye raboty* [The mathematical papers]. Moskva: ONTI (in Russian).

Newton, I. (1967–1981). *The Mathematical Papers*. In 8 vols. Cambridge: Cambridge University press.

Newton I. (1989). *Matematicheskiye nachala natural'noy filosofii* [Mathematical principles of natural philosophy]. Moskva: Nauka (in Russian).

Pemberton, H. (1728) *A View of Sir Isaac Newton's Philosophy*. London: Palmer.

Pogrebysskiy, I.B., Freyman, L.S. (1971). Analiticheskaya mekhanika (XVIII v.) [Analytical mechanics (XVIII century)]. In A. Grigoryan & I. Pogrebysskiy (Eds.), *Istoriya mekhaniki s drevneyshikh vremen do kontsa XVIII veka* [The history of mechanics from ancient times to the end of the XVIII century] (pp. 122–157). Moskva: Nauka (in Russian).

Pourciau, B. (2011). Is Newton's Second Law Really Newton's? *American Journal of Physics*, *79* (10), 1015–1022.

Pourciau, B. (2020). The Principia's Second Law (as Newton Understood it) from Galileo to Laplace. *Archive for History of Exact Sciences*, *74* (3), 183–242.

Truesdell, C. (1960). *The Rational Mechanics of Flexible or Elastic Bodies 1638–1788. Introduction to Leonhardi Euleri Opera Omnia, Series II, Vol. 10 and 11.* Zürich: Orell Füssli.

Truesdell, C. (1968). *Essays in the History of Mechanics*. Berlin; Heidelberg; New York: Springer Verlag.

Varignon, P. (1703). Manière générale de déterminer les forces, les vitesses,les espaces et les temps, une seule de ces quatre chosesétant donnée dans toutes sortes de mouvementsrectilignes variés à discretion (1700). *Mémoires de mathématique et de physique de l'Académie royale des sciences*, *2*, 22–27 (in French).

Varignon, P. (1725). *Nouvelle Mécanique ou Statique dont le projet fut donné MDCLXXXVII. Ouvrage posthume de M. Varignon, des Académies Royales des Sciences de France, d'Angleterre et de Prusse, lecteur du Roy en philosophie au College royal, et professeur des mathématiques au College Mazarin*. Paris: Claude Jombert (in French).

Vavilov, S. (1989). *Isaak N'yuton (1643–1727)* [Isaac Newton (1643–1727)]. Moskva: Nauka (in Russian).

Westfall, R.S. (1980). *Never at Rest. A Biography of Isaac Newton*. Cambridge: Cambridge University press.

Wilczek, F. (2004). Whence the Force of F = ma? I: Culture Shock. *Physics Today*, *57* (10), 11–12.

Yushkevich, A.P. (1948). Leybnits i osnovaniye ischisleniya beskonechno malykh [Leibniz and the basis of the calculus of infinitesimal]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*, *1* (23), 150–164 (in Russian).

Zeuthen, H.G. (1938). *Istoriya matematiki v XVI i XVII vekakh* [The history of mathematics in the XVI and XVII centuries]. Moskva: ONTI (in Russian).