

ИЗМЕРЕНИЯ В ИХ ИСТОРИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ

Ч. 8. СИСТЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОНЯТИЙ В МЕХАНИКЕ НЬЮТОНА

В. Г. Кнорринг

В восьмой статье цикла статей, посвященных истории измерений, показана важность того шага, который сделал Ньютон, четко определив основные величины механики и включив их в физические законы, допускающие экспериментальное подтверждение.

Ключевые слова: история измерений, количество материи, гравитационная масса, инертная масса, пространство, время, сила.

Исаак Ньютон родился в конце 1642 г., — того самого года, в начале которого умер Галилей. И если работы Галилея легли *в основу* научной революции, то труды Ньютона ознаменовали определенный *перелом* в этой революции. В основном закончился период нащупывания основных идей и понятий, начался период их обобщения и развития.

Важнейшие научные достижения Ньютона лежат в трех крупных областях (если не считать четвертой области — богословия).

В области *математики* он разделяет с Лейбницем славу завершителя основ дифференциального и интегрального исчисления. Правда, дальнейшее распространение и развитие этих исчислений больше связано с научной школой Лейбница.

В области *оптики* им выполнено большое число тщательно продуманных экспериментов, включая опыты по разложению белого света и синтезу цветов; предложено теоретическое объяснение ряда оптических явлений (в частности, преломления, интерференции); создан телескоп-рефлектор.

В области *механики* он сформулировал основные законы движения; теоретически обосновал законы движения планет, эмпирически найденные Кеплером; выполнил исследования по акустике и основам реологии. В этой последней области до сих пор используется понятие *ньютоновской жидкости*. К механике относится капитальный труд Ньютона — “Математические начала натуральной философии”, — опубликованный в 1687 г. В настоящей статье содержание этого труда, переведенного на русский язык великим ученым и инженером А. Н. Крыловым [1], будет рассмотрено с измерительных позиций.

Почему представляется целесообразным именно такой подход и именно к этой работе? Для ответа на этот вопрос вернемся к состоянию есте-

ственных наук до публикации фундаментального труда Ньютона.

Вот как обрисовывает ситуацию в физике XVII века Я. Г. Дорфман: “Путь развития экспериментальных исследований был в принципе ясен: требовалась прежде всего разработка, усовершенствование методов измерения и технологии изготовления различных новых физических аппаратов... Иначе обстояло дело в области физической теории. Физики XVII в. могли строить теоретически качественные гипотезы, но совершенно не располагали каким-либо методом построения количественных динамических теорий. Они не умели еще формулировать теоретические задачи физики в математической форме...” [2, с. 131].

Подобное же упоминание математики можно встретить у Я. Г. Дорфмана и при обсуждении текста Галилея о равновесии тела на наклонной плоскости: “Применяемые Галилеем термины “импульс” (*impeto*), “момент” (*momento*) и “энергия” (*energia*) не имели в то время строгого математического определения, именно поэтому он их перечисляет вместе” [2, с. 150—151].

Получается, что Галилей зачем-то “перечислил вместе” термины, соответствующие *различным* нынешним понятиям: импульса, момента и энергии. Но это не так! Очевидно, для Галилея *все эти термины* (а также и следующие за ними в обсуждаемом Дорфманом тексте “склонность к движению”, “сила” и “сопротивление”) *были синонимами*. Здесь дело вовсе не в математической нестрогости, а в нечеткости физического представления о силе в эпоху Галилея. Именно эта нечеткость заставила Галилея нагромождать подряд шесть синонимичных терминов, как если бы он не знал, на каком лучше остановиться!

Подобные же синонимы встречаем у Торричелли, согласно которому тяжесть тела в каждый

кратчайший промежуток времени (так пересказывает его мысль тот же Я. Г. Дорфман) порождает момент, равный абсолютному весу данного тела. Вот слова самого Торричелли: “Когда тяжелые тела покоятся, то все эти импульсы (*impeti*)... уничтожаются подпирающим телом, которое, не скрывая своего противодействия, непрерывно гасит все эти возникшие моменты” [2, с. 158—159].

Здесь мы снова видим “импульсы” и “моменты”, но эти слова обозначают на этот раз что-то вроде элементарных толчков. Динамический подход Торричелли (импульсы непрерывно возникают и непрерывно же гасятся) сам по себе чрезвычайно интересен, непривычен для нас и выражен в прекрасной литературной форме, но опять таки — разве недостатки этого описания объясняются слабостью Торричелли как математика? Зная о математических работах Торричелли, никак нельзя упрекнуть его в такой слабости.

И разве Гюйгенс “не умел еще формулировать теоретические задачи физики в математической форме”? Как видно хотя бы из “Маятниковых часов”, он прекрасно это делал.

Ввиду важности обсуждаемых здесь положений обратимся к содержательной, хотя в чем-то и спорной статье П. В. Харламова [3], утверждающего, что существуют *три различных механики*. Одна из них — прикладная или техническая механика — развивается эмпирико-индуктивным путем, причем правильность ее теоретических моделей должна быть подтверждена сопоставлениями с результатами наблюдений.

Прикладная механика исходит из наглядных образов, зачастую антропоморфных, наподобие мускульной силы. В ней “утверждается представление, что такие понятия не нуждаются в определениях, полагают достаточным указать процедуру установления численного значения меры [т. е. физической величины — В. Кн.], сопоставляемой этому понятию”. Заметим кстати, что распространенная в наше время *операционалистская* позиция в философии физики состоит именно в том, чтобы сводить определения величин к описаниям процедур измерения.

Противоположный характер, как говорит П. В. Харламов, носит “механикоподобная математика”. Ее объекты только в терминах сохраняют подобие объектам механики. В ней отсутствует необходимый в естественных науках начальный этап (наблюдение), а также и завершающий этап (соотнесение результатов с природными явлениями). Она имеет основанием систему аксиом, физическое содержание которых не обсуждается. Таким образом, по всем признакам она является именно математикой, а не механикой.

Промежуточное положение, по П. В. Харламову, занимает теоретическая механика. Она отличается от прикладной тем, что в ней рассматриваются не конкретные, а обобщенные ситуации.

Ясно, что математика *сама по себе* не может прояснить физическое содержание основных понятий экспериментальной науки, которая должна (по крайней мере, вначале) развиваться только “эмпирико-индуктивным путем”. Это показала и история науки: попытки Декарта, а затем Лейбница построить механику на основе умозрительно принятых аксиом оказались безуспешными.

Поэтому дело совсем не в том, что физики XVII в. “... не умели еще формулировать теоретические задачи физики в математической форме”, а только в том, что у них не было достаточно выкристаллизовавшегося измерительного материала для наполнения “математических форм”. Кстати, и “усовершенствование методов измерения”, о котором говорит Я. Г. Дорфман, было невозможно при отсутствии четкого понимания того, что же, собственно, следовало измерять.

Фундаментальная работа Ньютона [1] замечательна именно тем, что в ней впервые сделана попытка ясно, последовательно и в какой-то степени наглядно определить *основные величины механики*, в частности количество материи (массу), силу, количество движения. Поэтому рассмотрение ее в качестве важного рубежа *в истории измерений* представляется вполне оправданным.

Между прочим, если справедливо наше мнение относительно неспособности даже такого специалиста как Я. Г. Дорфман точно сформулировать противоречие в развитии физики XVII в., то это указывает на совершенно недостаточное внимание историков науки к измерительной проблематике.

Вернемся теперь к фундаментальной работе Ньютона и попытаемся выделить сильные и слабые стороны системы измерительных понятий, содержащихся в этой работе. Эт. е. именно система, и она заслуживает подробного рассмотрения — ведь по сути дела мы и сейчас пользуемся ею как в обыденной жизни, так и в технических науках. В основном она представлена Ньютоном в начальной части его труда, в разделе “Определения”.

Общая структура труда Ньютона такова: он состоит из двух коротких вводных разделов: “Определения” и “Аксиомы или законы движения”, за которыми следует основная часть, разделенная на три книги. Две первые книги названы одинаково: “О движении тел”, но в первой рассматривается движение только под действием “центростремительных сил”, а во второй учитываются силы сопротивления (например, жидкости, в которой движется тело), различным образом зависящие от скорости движения, и рассматриваются движения самой жидкости. Третья книга, более короткая, названа “О системе мира”. В ней, наряду с анализом движений планет и комет, содержатся рассуждения философского характера.

Итак, Определение I: “*Количество материи есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее*”. Легко критиковать это определение (как это и делал, например,

Эрнст Мах) за содержащийся в нем логический круг, — действительно, плотность как физическая величина не поддается определению независимо от массы.

Но иначе нельзя было поступить. *Первые величины науки не могут быть строго определены*, их можно только наглядно описать. В начале пути науке обязательно приходится, подобно Мюнхгаузену, “тащить себя за волосы из трясины”. Строгость появится потом, когда будут рассматриваться взаимосвязи между величинами — постепенно образуется как бы плотный настил из переплетающихся между собой величин, накрывающий исходную трясины.

Нужно заметить: когда эти слова уже были написаны, автору настоящей статьи попались на глаза в некоторой степени сходные выражения известного философа-постпозитивиста Поппера: “... наука не строится на гранитном основании эмпирического базиса... смелые конструкции ее теорий возвышаются над болотом и опираются на сваи, которые уходят в топь, никогда не достигая основания” [4, с. 16]. Ничего шокирующего в этом нет, история науки показывает, что она растет не только “вверх”, в сторону все большего развертывания своего материала, но и “вниз” — в сторону постепенного упрочения своих оснований.

Возвращаясь к ньютоновскому определению, добавим, что оно в скрытом виде содержит полемику с картезианцами, которые сводили количество материи в каком-либо теле к его объему, не учитывая возможных различий в плотности (хотя было хорошо известно, что существуют более плотные и менее плотные тела).

Отметим, что в переводе А. Н. Крылова после слов “количество материи” вставлен в скобках современный термин *масса*, но при этом сделана оговорка: в тексте всей книги самого Ньютона слово *масса* почти не встречается. Поэтому вряд ли можно считать правильным рассуждение специалиста по теории определений Д. П. Горского, которое начинается словами: “... Ньютон настаивает на определении массы как количества материи, указывая, что ее можно определять по весу тела...” и заканчивается выводом в неопозитивистском духе: “Понимание массы как количества материи, поскольку оно лишено всякого операционального смысла, становится ненужным для физики” [5, с. 164]. Горский не замечает, что Ньютон не “настаивал” на определении *массы* как количества материи, он давал определение именно *количеству материи*.

Здесь же уместно затронуть вопрос об идентичности или различии “тяжелой” и “инертной” масс. Вот что пишет по этому поводу Л. С. Минченко:

“Ньютон измеряет массу тела с помощью простой экспериментальной операции [взвешиванием — В. Кн.] и не обращает внимания на то, что таким образом он использует *дополнительное* свойство массы тела, не заложенное в *определении* понятия массы. Именно поэтому у Ньютона и

пропадает, по существу, разница между гравитационной и инертной массой” [6, с. 143—144].

Это вдвойне неверно. Во-первых, в исходном определении количества материи никаких, ни основных, ни дополнительных свойств не было заложено. Во-вторых, в тексте Ньютона, следующем за этим первым определением, ясно сказано: “Определяется масса по весу тела, ибо она пропорциональна весу, что мною найдено опытами над маятниками, произведенными точнейшим образом...”.

Как видно, Ньютон считал необходимым экспериментально проверить пропорциональность между массой (инертной!) и весом, а это значит, что он исходно *предполагал возможность отсутствия такой пропорциональности*.

Очень важную роль в этом и других определениях играют слова *мера таковой* (метрологически правильнее звучало бы громоздкое выражение: *величина, характеризующая таковую*). Эти слова подчеркивают, что речь идет не о некоторой сущности, а именно о величине, приписываемой сущности.

Здесь нужно вспомнить, что и древние, и средневековые ученые, и даже великие деятели XVII века не различали разнообразные *сущности* с одной стороны и характеризующие их *величины* с другой. Многочисленные примеры были приведены в предыдущих статьях нашего цикла. Напомним некоторые из них.

Вот текст Аристотеля из “Метафизики” (книга 5, гл. 13): “...Из величин непрерывная в одном направлении есть длина, в двух направлениях — ширина, в трех направлениях — глубина. Из всех этих количеств ограниченное множество есть число, ограниченная длина — линия, ограниченная ширина — плоскость, ограниченная глубина — тело”. Получается, что плоскость и тело суть величины.

Вот Кеплер говорит о величинах как о действующих причинах: “Есть четыре причины, соревнующиеся друг с другом в определении продолжительности времени обращения [планет]. Первая — это длина пути, вторая — вес или количество переносимой материи, третья — это сила движущей мощи, четвертая — объем или пространство, занимаемое увлекаемой материей”. По современным представлениям длина, вес, объем и другие величины не могут быть *причинами* чего-либо, — они только *характеризуют* вещи и процессы.

Вот Галилей пишет о пропорциональности проводимых свободно падающим телом *пространств* квадратам времен. Как бы ни определять пространство, величиной оно не является и в пропорцию входить не может.

Наконец, вот Паскаль, старший современник Ньютона, описывая прототип гидравлического пресса, использует формулировку: “силы... относятся друг к другу, как *отверстия*”.

Пожалуй, только у Ньютона впервые с полной определенностью различаются *сущность* и ее *мера* (характеризующая ее величина). Правда, и он не

езде выдерживает это различие (в частности, тоже говорит о *пространствах* в количественном смысле), но исходные позиции им выражены четко.

Интересно, что Лейбниц интерпретировал ньютоновские *объем и плотность* как соответственно *протяженность и интенсивность* материи [7, с. 144; 8, с. 285]. Эти два термина, стоящие рядом, заставляют вспомнить формулировку представителя парижской школы средневековых номиналистов Марсилия Ингена: “Различают *большее* качество и *более интенсивное* качество...” [9, с. 68].

Переходя к Определению II: **“Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе”**, отметим его формальную симметрию с Определением I: “Количество материи есть мера таковой, ...”. Эта симметрия как бы провозглашает *равноправие материи и движения!* Однако она неполна: масса, введенная первым определением, входит как сомножитель во второе определение. Таким образом, материя все-таки логически предшествует движению.

За этим определением следует единственная поясняющая фраза, декларирующая *аддитивность* количества движения: оно есть сумма количеств движения отдельных частей тела.

Возвращаясь к симметрии определений, добавим: так же, как в Определении I фигурировала произвольно введенная величина — *плотность*, в Определении II содержится произвольно введенная величина — *скорость*. Следуя Лейбницу (и Марсилию Ингену), можно было бы назвать ее *интенсивностью* движения. Обе эти величины в настоящее время вводятся как *отношения*: плотность однородного тела $\rho = m/V$, где m — масса и V — объем тела; скорость равномерного движения $v = s/t$, где s — путь и t — время движения.

Однако Ньютон не хочет в явном виде записать или хотя бы словесно описать эти отношения. Видимо, дело не только в неизбежном логическом круге первого определения — ведь во втором определении этого круга нет. Возможно, Ньютон не хотел ввязываться в обсуждение вопроса о том, допустимо ли деление неоднородных величин, который беспокоил Эйлера [10, с. 287, 288] и рассматривался многими последующими учеными вплоть до К. П. Широкова [11].

Кроме того, в оба отношения входят пространственно-временные величины, а они в его работе занимают особое место. Рассуждения о пространстве и времени вынесены Ньютоном в отдельное “Поучение” к системе исходных определений, якобы потому, что в определении нуждаются только “менее известные названия”, а “время, пространство, место и движение составляют понятия общеизвестные”.

Но это, конечно, лукавство. Тут же Ньютону приходится фактически брать свои слова назад: оказывается, что эти “общеизвестные” понятия суть всего лишь *относительные, кажущиеся, обыденные*. Необходимые же ему *абсолютные, истин-*

ные, математические понятия приходится вводить с помощью своего рода заклинаний — определениями их назвать трудно.

Обратившись к “Поучению”, видим первое такое заклинание, — знаменитую формулировку, относящуюся к времени.

“Абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему, протекает равномерно, и иначе называется длительностью”.

Как Аристотель, так и Августин сочли бы *равномерное протекание без отношения к чему-либо внешнему* бессмыслицей. Надо полагать, что Ньютон знал, с какими трудностями столкнулись и тот, и другой при размышлениях о времени. Однако он предпочел закрыть глаза на эти трудности ради математической стройности того здания, которое он собирался построить — *фактически без фундамента!*

Так же разделяется он и с пространством.

“Абсолютное пространство по самой своей сущности, без всякого отношения к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным”.

Здесь тоже напрашивается вопрос: *по отношению к чему неподвижным?* Ведь уже Галилей прекрасно понимал, что протекание физических процессов на равномерно движущемся объекте, например, на корабле, не зависит от его скорости!

Но Ньютона это тоже не смущает. Более того, он приводит тот же пример с кораблем: “... Если та часть Земли, где корабль находится, движется на самом деле к востоку со скоростью 10 010 частей, корабль же идет к западу со скоростью 10 частей, моряк же ходит по кораблю и идет к востоку со скоростью одной части, то истинно и абсолютно моряк перемещается в неподвижном пространстве к востоку со скоростью 10 001 частей, по отношению же к Земле — на запад со скоростью 9 частей”.

С точки зрения теории измерений рациональная мысль в этих заклинаниях есть. Она четче выражена Ньютоном применительно к времени и заключается в том, что “меры продолжительности”, употребляемые в обыденной жизни — “час, день, месяц, год” — не абсолютно стабильны. Ньютон напоминает, что солнечные сутки между собой неравны, и что это неравенство исправляется с помощью уравнивания времени. Он говорит: “Возможно, что не существует (в природе) такого равномерного движения, которым время могло бы измеряться с совершенною точностью. Все движения могут ускоряться или замедляться, течение же абсолютного времени изменяться не может”.

Различие между идеальной, *теоретической шкалой* измеряемой величины и *реальной шкалой*, фактически используемой при измерениях [12], выражено здесь с полной ясностью — не впервые ли в истории измерений?

Аналогичных рассуждений о пространстве у Ньютона нет (есть только сомнение в существовании абсолютно неподвижного тела), но их легко домыслить. Даже если мы измеряем длину путем повторного прикладывания меры, то необходимо постулировать возможность движения меры в пространстве при независимости (инвариантности) ее размера от перемещения, идеальную “стыковку” прикладываний и т. д.

С позиций теории измерений был бы более логичен индуктивный ход мыслей. Применительно к времени можно было бы начать с указания на известный из опыта факт наличия в природе циклических (повторяющихся) процессов. Далее можно было бы заметить, что одни циклические процессы хуже, а другие лучше согласуются между собой в смысле постоянства числа циклов одного процесса, *одновременных* с заданным числом циклов другого процесса (в XX веке так рассуждал о времени Рудольф Карнап [13]). А затем потребовался бы своего рода предельный переход к воображаемым идеально согласующимся процессам, которыми и измерялось бы “абсолютное время”. Примерно так же можно было бы ввести идеально измеряемые пространственные величины. Затем можно было бы перейти к скорости, и т. д.

Но, если бы Ньютон пошел по этому пути, его работа могла бы повторить (вернее, предвосхитить) судьбу “Элементов физики” Н. Р. Кемпбелла [14], — задуманного в начале XX века много-томного издания, автор которого, занявшись в первом томе анализом измерения, так и не смог продвинуться дальше. И мы должны быть благодарны Ньютону за то, что он, не испугавшись *логическими пробелов* в самом начале своего труда, смело двинулся вперед.

Итак, скорость движения как физическая величина Ньютоном не определена, хотя в тексте его труда этот термин не раз встречается. Относительно того, кто первый после Ньютона выразил скорость формулой, в литературе имеются разные мнения.

И. Б. Погребысский пишет: “Вариньон был очень доволен открытием... фундаментальных формул для движения по прямой или по кривой — формул для скорости $v = ds/dt$ и для ускорения dds/dt^2 , опубликованных в 1700 г.” [7, с. 153; 8, с. 292].

Совсем другое утверждает М. М. Гернет [15], говоря о трактате Вольтера “Размышления об измерении движущих сил и их природе”, опубликованном в 1741 г.: “Формула скорости как путь, деленный на время, была написана впервые Эйлером лишь за пять лет до того, как Вольтер представил в Академию наук рассматриваемый нами трактат”. Здесь явно имеется в виду “Механика” Эйлера, вышедшая в 1736 г. Утверждение о приоритете Эйлера, по-видимому, взято из предисловия В. П. Егоршина к русскому переводу

части работ Эйлера [10, с. 24]. Такое же утверждение имеется в работе М. А. Розова [16, с. 212], который прямо ссылается на указанную страницу текста В. П. Егоршина.

Вряд ли можно согласиться с приоритетом Эйлера при такой поздней дате.

Прежде, чем вернуться к ньютоновским определениям других важнейших величин, отметим еще две тонкости в тексте “Поучения”, относящиеся соответственно к времени и пространству.

Во-первых, слова “...время... иначе называется длительностью” не согласуются с современной языковой практикой.

Время как таковое измеряется, говоря современным языком, в *шкалах интервалов* (солнечное, эфемеридное, атомное время и т. д.). Шкалы интервалов характеризуются условным нулем — мы должны договориться о начале отсчета времени и, вообще говоря, можем произвольно менять это начало. Действительно, если не говорить о “большом взрыве”, ось времени представляется нам линией, бесконечной в обе стороны (как в прошлое, так и в будущее), а условное начало отсчета — некоторой точкой этой линии в прошлом. Значение текущего времени (эпоха или дата) есть координата текущего момента — точки на оси времени, изображающей настоящее; эта точка непрерывно движется, и соответствующее ей числовое значение постоянно обновляется всеми работающими часами.

Длительность события есть расстояние во времени между моментом конца события и моментом его начала. Длительность имеет естественный нуль и измеряется в *шкалах отношений*. Длительность закончившегося события является фиксированной величиной. Таким образом, время как таковое и длительность — понятия различные.

Во-вторых, в том же Поучении, в тексте, посвященном понятию *места*, интересны слова о *пространственном положении*: “Положение, правильно выражаясь, не имеет величины, и оно само по себе не есть место, а принадлежащее месту свойство”.

Это, хотя и небольшое, внимание, уделенное Ньютоном понятию *положения*, замечательно по той причине, что даже в настоящее время метрологический статус этого понятия в основополагающих документах и монографиях не закреплен. Вместе с тем, например, в области угловых измерений существуют цифровые датчики *положения* (“абсолютные”) и цифровые датчики *перемещения* (“инкрементные”). Угловое перемещение является параметром, соответствующим *плоскому углу* как измеримой величине, и измеряется в шкале отношений, а чем является угловое положение? Ясно, что оно измеряется не в шкале отношений, а в шкале интервалов (не совсем обычной, обладающей периодичностью), причем соответствующее ему число называется угловой координатой. В области линейных измерений положение в трехмерном пространстве характеризуется в ин-

тервальных шкалах обычного типа линейными координатами. Ни в том, ни в другом случае положение не является величиной. Но обобщающий термин для подобных атрибутов объектов, по-видимому, официально не установлен.

Таким образом, обе отмеченные нами тонкости относятся к различию между шкалами интервалов и шкалами отношений. Это различие Ньютон не заметил, говоря о времени, но зато подчеркнул его, говоря о пространстве.

В следующем Определении III появляется термин “сила”, но не в привычном для нас смысле: “*Врожденная сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения*”.

К этому определению, которое по существу уже содержит в себе закон инерции, Ньютон сделал короткие комментарии.

Он пишет, в частности: “Эта сила проявляется телом единственно лишь, когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии. Проявление этой [врожденной — В. Кн.] силы может быть рассматриваемо двояко: и как сопротивление, и как напор”.

Отметим, что *другая сила* — это действительно сила в современном смысле. Ньютону приходится явочным порядком ввести это понятие, определение которого еще впереди — трудно соблюдать логику, начиная плести “настил из величин” над хлоплюющей под ногами трясинной!

Но и “врожденная сила материи”, не будучи собственно силой, *проявляется* тоже как настоящая сила — это сила пассивного *сопротивления* при активной попытке изменить состояние тела или сила *напора* при встрече движущегося тела с пассивным препятствием. Эти две ситуации Ньютон считает нужным различить.

Поскольку наличие “врожденной силы материи” не предполагалось в определении количества материи, приходится явно указать на их связь: “Эта сила всегда пропорциональна массе, и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на нее”. В дальнейшем тексте Ньютона это едва заметное различие между количеством материи и ее “врожденной силой” не используется. Зачем же вообще потребовалось новое понятие?

Представляется, что здесь мы снова видим полемику с Декартом, который признавал у материи единственный атрибут — протяжение. “Врожденная сила материи”, не будучи полноправной величиной, характеризует материю как нечто, обладающее внутренней активностью.

Определение IV по сути дела содержит уже сказанные слова, только в другом порядке: “*Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения*”.

Это есть действительно определение силы, но оно носит чисто качественный характер: не только методы, но и сама возможность измерения или количественного оценивания силы не указываются. Важно только то, что приложенная сила, в отличие от средневекового импетуса, является внешней по отношению к телу, и, как сказано в поясняющем тексте, “*по прекращении действия в теле не остается*”. Заметим, что “оставаться в теле” могла бы скорее некая субстанция (каковой и был импетус), а не физическая величина. Поэтому здесь отсутствует и слово “мера”, которым Ньютон как бы маркирует физические величины, — ведь ему ничего не стоило выразиться иначе: “Приложенная сила есть мера действия, производимого...”.

Определением V вводится конкретная важная для Ньютона *центростремительная сила* — в качестве ее примеров указаны: сила тяжести на поверхности Земли; сила притяжения магнита; сила, отклоняющая планеты от прямолинейного движения; наконец, сила, удерживающая камень во вращающейся праще.

С позиций теории измерений важна последняя фраза комментария, в которой различаются в центростремительной силе “*три рода величин: абсолютная, ускорительная и движущая*”. Это показывает, что центростремительная сила у Ньютона сама есть не величина, и даже не субстанция, а скорее некоторая ситуация (ее можно было бы назвать *ситуацией взаимодействия тел*). Следующие три определения разъясняют три перечисленных понятия, и в каждом из этих определений уже заложено ключевое слово *мера*.

Определение VI объясняет понятие *абсолютной величины центростремительной силы*, которая есть “*мера большей или меньшей мощности самого источника ее распространения из центра в окружающее его пространство*”. Здесь по сути дела вводится представление о силовом поле — а как иначе понять “распространение силы в пространство”? Похоже, что Ньютон мягко пытается избежать *дальнего действия*, за которое его осуждали.

Определение VII еще ближе подводит читателя к полевым понятиям: “*Ускорительная величина центростремительной силы есть мера, пропорциональная той скорости, которую она производит в течение данного времени*”. А. Н. Крылов так и говорит в примечании, что это определение соответствует современному понятию напряженности поля (он использует более старый термин “напряжение поля”). А. Н. Крылов подчеркивает также, что Ньютон рассматривает приращение скорости в течение конечного времени и *нигде не применяет понятия ускорения*.

Наконец, Определение VIII: “*Движущая величина центростремительной силы есть ее мера, пропорциональная количеству движения, которое ею производится в течение данного времени*”. Далее поясняется: “Эта величина есть направленное к центру стремление всего тела, которое и называ-

ется его весом. Движущая сила распознается по силе, ей равной и противоположной, которая могла бы воспрепятствовать опусканию тела”.

А. Н. Крылов комментирует: Ньютон обращает внимание на способ измерения рассматриваемой величины — уравнивание ее другой силой. Но с нашей точки зрения это, строго говоря, не способ измерения, а способ сравнения. Шкалу силы как физической величины Ньютон не строит — для него достаточно ссылки на практику взвешивания. Правда, дальше в тексте пояснения мимоходом брошено: “...это полное стремление составляется из стремлений отдельных частиц тела”, т. е. отмечена аддитивность веса, — как раз то его свойство, которое используется для построения шкалы.

Интересно заметить, как постепенно сужается поле зрения: Определение VI уже исключает из рассмотрения прашу, а пояснение к Определению VIII не оставляет места и для магнитного притяжения. Ясно, что Ньютона в конечном итоге интересуют законы движения небесных тел под действием сил тяготения.

Используя сходные по конструкции термины “ускорительная сила” и “движущая сила”, Ньютон счел нужным подчеркнуть различие между соответствующими понятиями с помощью замечательной пропорции между величинами как таковыми: “... Ускорительная сила так относится к движущей, как скорость к количеству движения”.

Далее следует столь же замечательное рассуждение о различии между массой и весом: “... Близ поверхности Земли, где ускоряющая сила тяжести для всех тел одна и та же, движущая сила тяжести, или вес, пропорциональна массе тела... Вообще вес будет постоянно пропорционален массе тела и ускоряющей силе тяжести. Так, например, в тех областях пространства, где ускоряющая сила тяжести вдвое меньше, вес массы вдвое или втрое меньшей будет вчетверо или вшестеро меньше, нежели близ поверхности Земли”.

Вспомним, что даже сейчас на бытовом уровне массу и вес практически не различают, а совсем недавно их и измеряли в одноименных единицах — килограммах. Ньютон же с исключительной четкостью различает их.

В разделе “Аксиомы или законы движения” введенные понятия непосредственно используются. Отметим несколько непривычную для нас формулировку второго закона. Мы привыкли записывать его в виде $F = ma$, где F — сила, m — масса и a — ускорение. Ньютон же дает такую формулировку: “Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила действует”.

Здесь ничего не сказано о времени действия силы! Однако время неявно присутствует уже в первой фразе поясняющего текста: “Если какая-нибудь сила производит некоторое количество движения, то двойная сила произведет двой-

ное, тройная — тройное, будут ли они приложены разом все вместе, или же последовательно и постепенно”. Эта “постепенность” в какой-то степени напоминает упомянутые выше “моменты” (элементарные толчки) Торричелли. Именно она позволяет в дальнейшем, в общем “Поучении” к разделу, говорить о том, что постоянная сила, действуя одинаково “в отдельные равные между собою весьма малые промежутки времени” сообщает телу скорости, пропорциональные времени, так что проходимые телом “пространства” относятся как квадраты времен движения.

Весьма важно содержащееся в ньютоновской формулировке закона указание на векторный характер количества движения. Вместе с третьим законом о равенстве действия и противодействия это немедленно приводит к утверждению о постоянстве суммарного количества движения в системе взаимодействующих тел.

Однако Ньютон счел нужным упомянуть и о том, что высота подъема брошенного тела пропорциональна начальной скорости и времени, но время движения само пропорционально скорости, и поэтому высота пропорциональна квадрату скорости. Здесь в неявном виде сталкиваются две величины, характеризующие движение — tv и tv^2 , — относительно которых в конце XVII и начале XVIII века велась длительная и ожесточенная дискуссия.

Замечательно в изложении Ньютона то, что его аксиоматический стиль уживается с многочисленными ссылками на эксперименты — как выполненные другими учеными, так и собственные. Такие ссылки делаются даже там, где защищаемые положения представляются совершенно очевидными.

Так, третий закон о равенстве действия и противодействия очевиден: при мысленном рассмотрении по отдельности двух взаимодействующих тел *одно и то же* взаимодействие между ними проявляется в виде двух равных и противоположно направленных сил. Ньютон и сам говорит, что “преобладающее давление” одного из тяготеющих тел на разделяющее их препятствие привело бы к тому, что вся эта система, двигаясь ускоренно, ушла бы в бесконечность, что нелепо. Тем не менее, он счел необходимым выполнить и описать опыт с магнитом и железом, помещенными в отдельные сосуды, плавающие на спокойной воде. Эти сосуды, касаясь друг друга, не приходили в движение сами по себе, что и подтвердило справедливость третьего закона.

Другими, более сложными опытами с соударением маятников Ньютон (ссылаясь также на Уоллиса, Рена и Гюйгенса, открывших “законы удара и отражения тел”) подтвердил вывод о постоянстве суммарного количества движения. При этом использовалась специальная методика для расчетного исключения влияния сопротивления воздуха,

чтобы опыты производились “как бы в пустоте”. Для учета неидеальной упругости сталкивающихся тел Ньютон произвел опыты со специально изготовленными телами, в различной степени неупругими: шарами из стекла, стали, пробки, а также “мячами, плотно смотанными из шерсти и затем сильно обжатыми”. Подлежало подтверждению — и вполне подтвердилось — предположение о том, что при данной “степени упругости” (термин Ньютона!) относительная потеря скорости постоянна.

При описании опытов Ньютон сообщает предельное значение погрешности (меньше трех дюймов) и перечисляет источники составляющих погрешности.

К опытам с маятниками Ньютон возвращается во второй части своего труда, где рассматривается движение тел в сопротивляющейся среде. Здесь он математически исследует три случая: сопротивления, пропорционального первой степени скорости (предположение “более математическое, нежели соответствующее природе” [1, с. 325]), сопротивления, пропорционального квадрату скорости и сопротивления, пропорционального частично первой и частично второй степени скорости.

При этом Ньютон, работая с помощью пропорций, а не уравнений, не вводит никаких физических величин, характеризующих среду (за исключением уже введенной плотности), хотя и говорит о “сцеплении” и “трении” [1, с. 368].

Движению маятников в пустоте и в сопротивляющейся среде посвящен отдел VI второй книги. Еще до этого Ньютон заявляет, что “тяжесть тела, находящегося внутри жидкости, двоякая: одна — истинная и абсолютная, другая же — кажущаяся, обыденная и относительная... Обыденный и относительный [вес] есть избыток веса, с которым тело более стремится вниз, нежели жидкость, его окружающая” [1, с. 382].

Это различие между истинным и кажущимся весом понадобится Ньютону при анализе движения маятника, поскольку возвращающая сила зависит именно от кажущегося веса (а инерционность груза — от его массы). Но вначале рассматриваются колебания маятника в пустоте, причем Ньютон еще раз повторяет: “По некоторым, произведенным точнейшим образом, опытам я нашел, что масса всякого тела всегда пропорциональна его весу” [1, с. 393].

Не ограничиваясь простым утверждением, он (в другом месте книги) описывает именно эти опыты с маятниками, в деревянные “кадочки” которых помещались золото, серебро, свинец, стекло, песок, обычная соль, дерево, вода, пшеница. “Для тел одинакового веса разность количеств вещества, даже меньшая одной тысячной доли полной массы, могла быть с ясностью обнаружена этими опытами” [1, с. 515].

Принципиальную важность описанных опытов можно видеть из того, что Бессель в 1828 г. повторил их со всей тщательностью для ряда ве-

ществ (включая *метеорное железо!*), и тоже не нашел систематических расхождений.

В свете этого совершенно непонятно, как могут нынешние комментаторы утверждать, что “у Ньютона пропадает... разница между гравитационной и инертной массой”!

Изложение опытов с маятниками, имевших целью определить закономерности сопротивления среды, занимает 13 страниц, заполненных числовыми расчетами [1, с. 408—421]. Такой объем материала поразителен в свете признания Ньютона: бумага, на которой он записал опыт, пропала, и *не все дроби*, необходимые для расчетов, остались в его памяти. А. Н. Крылов добавил в примечании: “...в Опытном судостроительном бассейне были произведены... опыты, подобные описанным Ньютоном... Запись величины размахов производилась фотоэлектрическим способом с весьма большою точностью”.

Очень подробно, с учетом всех мешающих факторов, описаны Ньютоном и опыты с падением различных тел в воде и в воздухе [1, с. 456—465], позволившие ему сделать вывод: “... сопротивление движению шаров как в воде, так и в воздухе представляется в общем весьма правильно нашей теорией”.

Таким образом, у Ньютона удивительным образом сочетаются, с одной стороны, формальные математические выкладки, часто имеющие вид учебных задач с произвольно заданными, иногда противоречащими действительности условиями, и, с другой стороны, подробное описание реальных экспериментов, включающее даже конструктивные особенности крюков для подвешивания маятников. В необходимых случаях он ссылается на эксперименты других ученых; так, занимаясь в конце второй книги своего труда вопросами акустики, он не только упоминает опыты Совера с органными трубами, но и высказывает (верную) догадку о том, что длина волны звука вдвое больше длины трубы.

Третью книгу, “О системе мира”, нет необходимости подробно рассматривать здесь, хотя и в ней есть некоторые моменты, представляющие интерес с измерительной точки зрения. Заканчивает эту книгу, а вместе с ней и весь труд Ньютона, замечательное “Общее поучение”, содержащее, наряду с богословскими рассуждениями, знаменитые слова:

“Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... 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”.

Давая общую оценку измерительному содержанию основного труда Ньютона, следует отметить, наряду с решительностью и смелостью, о которых уже говорилось выше, удивительную осмотрительность, научную сдержанность великого

физика. В аксиоматическом стиле и достаточно строго определены только величины, самые необходимые для создаваемой им механики. Оказалось возможным обойтись, например, без понятия ускорения в механике твердых тел и без понятия вязкости в механике жидкостей. Зато все введенные величины тщательно и в то же время без ненужного формализма обсуждены.

Впоследствии ряд ученых пытался строить механику, не используя исходного у Ньютона (и вызывавшего много нареканий) понятия массы. В 1953 г. Дж. МакКинси, К. Шугар и П. Сапс (Suppes), исследовавшие аксиоматические основы механики, показали, что понятия массы и силы “дефиниционально независимы друг от друга, а, значит, все попытки их сведения друг к другу логически ошибочны” [17, с. 107].

В целом работа Ньютона содержит гигантский синтез идей всех его предшественников по научной революции, от Кеплера до Гюйгенса. Этим синтезом научная революция была в основном завершена.

* * *

Главной целью этой статьи было выявление конкретных достижений Ньютона в теории измерений. Но наряду с этим необходимо затронуть и некоторые мировоззренческие вопросы. Дело в том, что у многих современных авторов “мир Ньютона” предстает как нечто бездушное, противоречащее мироощущению нормального человека, сохранившемуся еще с первобытных времен. Заодно некоторые авторы склонны бичевать и измерение, и даже вообще научное исследование.

Вот как характеризует, например, это первобытное мироощущение В. Н. Топоров [18, с. 15]: “...пространство (как и время)... “качественно” по преимуществу, и его “качество” определяется объектами, в нем находящимися. Таким образом, для архаического сознания пространство есть нечто предельно противоположное изотропному и гомогенному абсолютному пространству Ньютона, характеризующемуся неизменностью и, так сказать, пустотой, т. е. бесструктурностью (отсюда — измерение как нахождение единственного параметра такого пространства)”.

Конечно, частично с этим можно согласиться: в первой статье нашего цикла тоже говорилось, что переход от качественных к количественным (числовым) оценкам *обедняет* описание явлений. Но В. Н. Топоров выражается уж очень резко: он чуть ли не отождествляет измерение с пустотой!

“Бездушная машина Ньютона” появляется также в некоторых работах Сергея Георгиевича Кара-Мурзы. Вот пример такого текста:

“За двадцать тысяч лет цивилизации человек остался существом с сильным космическим чувством, с ощущением себя в центре Вселенной как родного дома. Он воспринимал Природу как целое, а себя — как часть Природы. Все было наполнено смыслом, все связано невидимыми стру-

нами. Природа не терпит пустоты! Ощущение времени задавалось Солнцем, Луной, сменами времен года, полевыми работами — время было циклическим. У всех народов и племен был миф о *вечном возвращении*. Научная революция разрушила этот образ: мир предстал как бездушная машина Ньютона, а человек — как чуждый и даже враждебный Природе субъект (Природа стала объектом исследования и эксплуатации). Время стало линейным и необратимым. Это было тяжелое потрясение, из которого родился европейский нигилизм и пессимизм (незнакомый Востоку)” [19, с. 576].

Правда, далее в той же работе Ньютон как бы получает прощение: “Русская культура освоила науку без слома присущего ей мироощущения... Модель мира Ньютона ужилась в русской культуре с крестьянским космическим чувством — они находились в сознании на разных полках” [19, с. 578—579].

Но правильно ли говорить о “бездушной машине Ньютона”?

С одной стороны, оказывается, что выражение “мировая машина” использовалось в европейской науке задолго до Ньютона. Его можно найти у Николая Кузанского (1401—1464). Во второй книге труда “Об ученом незнании” читаем: “...невозможно..., чтобы у мировой машины эти чувственные земля, воздух, огонь или что бы то ни было еще были фиксированным и неподвижным центром” [20, с. 131]. Чтобы не было сомнений, переводчик этого текста даже вставил в скобках выражение оригинала: *machina mundana*. Несколько дальше в том же труде Николай говорит о Боге: “И он сам пожелал, чтобы изумительная машина мира приводила нас в удивление, но скрывает ее от нас тем больше, чем больше мы изумляемся...” [20, с. 142].

Еще раньше — в середине XIII века — машиной называли мир Роберт Гроссетест и Джон Холлиуд, известный также под латинизированным именем Иоанн Сакробоско [21, с. 109—110].

С другой стороны, для самого Ньютона, как и для его предшественников, абсолютное пространство вовсе не было “пустотой”.

Обратимся к фундаментальной (и неоднократно цитировавшейся в предыдущих статьях нашего цикла) монографии В. П. Зубова [22]. Вот как этот историк характеризует воззрения Генриха Мора:

“Поскольку пустое пространство имеет протяжение и поддается измерению, полагал Мор, оно есть нечто реальное, некая протяженная субстанция, гораздо более “тонкая”, чем тела... Подобно Ньютону, который, под его влиянием, определял абсолютное пространство как “чувствилище божие” (*sensorium dei*), Мор утверждал, что “это тонкое протяжение... есть некая тень или знамение божественной сущности ...” [22, с. 200—201]. Как видим, логика здесь прямо противоположна логике В. Н. Топорова: если пространство измеримо, значит, оно не пусто!

Там же В. П. Зубов упоминает мнения Якоба Дюбуа (из его книги, вышедшей в 1653 г.) и Афонасия Кирхера (1656 г.), которые тоже приписывали пространству “полноту божественного всеприсутствия”.

А вот слова самого Ньютона: “Такое изящнейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе, как по намерению и по власти могущественного и премудрого существа” [1, с. 659]. Где же тут “бездушная машина”?

Развивая эту мысль, Ньютон пришел к тому, что Бог “весь себе подобен, весь — глаз, весь — ухо, весь — мозг, весь — рука, весь — сила чувствования, разумения и действия, но по способу, ... для нас совершенно неведомому” [1, с. 661]. Знал ли он, что *в точности ту же идею* высказал в VI веке до н. э. Ксенофан из Колофона, которого считают зачинателем элейской школы? Этот философ учил, что, коль скоро Бог один, то должен быть повсюду подобен: повсюду видящим, повсюду слышащим и повсюду обладающим прочими чувствами [23, с. 160].

От Ксенофана до Ньютона — у многих мыслителей прослеживается идея “божественного всеприсутствия”, которая никак не совмещается с приписываемым Ньютону представлением о пустоте и бесструктурности пространства (отметим заодно в конце высказывания Ньютона апелляцию к “ученому незнанию” — совсем по Николаю Кузанскому!).

Скорее всего, если научное представление о мире и стало бездушным, то не у самого Ньютона, а у его последователей, которые заимствовали у него формальный аппарат и отсекали с помощью пресловутой “бритвы Оккама” мировоззренческие вопросы.

* * *

В заключение вернемся на короткое время к современнику Ньютона, упомянутому в начале статьи, — Готфриду Вильгельму Лейбницу (1646—1716): историкам математики он видится равновеликим Ньютону, а специалисты по кибернетике даже склонны выдвигать его на роль “святого покровителя” этой науки [24, с. 438]. Действительно, Лейбниц много занимался двоичной системой счисления, думал о создании универсального символического языка, строил механические вычислительные машины.

Его вклад в историю измерений представляется более скромным. Статья Лейбница “Краткое доказательство памятной ошибки Декарта...” (1686 г.) послужила началом многолетней дискуссии о “мерах сил движения” как важнейших физических величинах (между прочим, в 1741 г. в ней принял участие Вольтер [15], а в 1746 г. — двадцатидвухлетний Кант, о чем можно прочитать в “Диалектике природы” Энгельса). Среди прикладных работ Лейбница известна его попытка построить часы с системой баланс — спираль [8], по-видимому, не повлиявшая на дальнейшее развитие часового дела.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ньютон Исаак*. Математические начала натуральной философии / Пер. с латинского А. Н. Крылова. — М.: Наука, 1989. — 688 с. (репринтное воспроизведение издания 1936 г.).
2. *Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века. — М.: Наука, 1974. — 352 с.
3. *Харламов П. В.* Почему спорят механики об основаниях своей науки? // Исследования по истории физики и механики. — М.: Наука, 1989. — 267 с.
4. *Ледников Е. Е.* Критика позитивистских и постпозитивистских концепций философии науки / Отв. ред. В. Н. Карпович, А. В. Бессонов // Научное знание: логика, понятия, структура. — Новосибирск: Наука, 1987. — С. 5—22.
5. *Горский Д. П.* Определение (логоико-методологические проблемы). — М.: Мысль, 1974. — 312 с.
6. *Минченко Л. С.* Ньютонианские и картезианские идеи в творчестве Л. Эйлера как физика // Физика на рубеже XVII — XVIII вв. / Отв. ред. А. Н. Боголюбов. Составитель У. И. Франкфурт. — М.: Наука, 1974. — С. 138—178.
7. *Погребыский И. Б.* Лейбниц и классическая механика // У истоков классической науки / Отв. ред. А. Н. Боголюбов. Составитель У. И. Франкфурт. — М.: Наука, 1968. — С. 123—157.
8. *Погребыский И. Б.* Готфрид Вильгельм Лейбниц, 1646—1716. — М.: Наука, 1971. — 320 с.
9. *Григорьян А. Т., Зубов В. П.* Очерки развития основных понятий механики. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 264 с.
10. *Эйлер Л.* Основы динамики точки. — М.: ОНТИ НКТП СССР, гл. ред. технико-теоретич. лит-ры, 1938. — 500 с.
11. *Широков К. П.* Интерпретация уравнений связи между физическими величинами // Общие вопросы метрологии: Труды метрологических институтов СССР. — Л.: Энергия, 1977. — Вып. 200 (260). — С. 3—12.
12. *Кнорринг В. Г.* Предложения по терминологии в области шкал // Сб. докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям SCM'98, СПб. — Т. 1. — С. 63—69.
13. *Карнап Р.* Философские основания физики. Введение в философию науки. — М.: Прогресс, 1971. — 390 с.
14. *Campbell N. R.* Physics. The elements. — Cambridge: University Press, 1920. — 565 pp.
15. *Гернет М. М.* О выступлении Вольтера на стороне картезианцев в дискуссии о мерах движения // Исследования по истории физики и механики. — М.: Наука, 1989. — С. 145—157.
16. *Розов М. А.* Проблемы эмпирического анализа научных знаний. — Новосибирск: Наука, 1977. — 233 с.
17. *Целищев В. В., Карпович В. Н., Поляков И. В.* Логика и язык научной теории. — Новосибирск: Наука, 1982. — 181 с.
18. *Топоров В. Н.* Первобытные представления о мире (общий взгляд) // Очерки истории естественнонаучных знаний в древности / Отв. ред. А. Н. Шамин. — М.: Наука, 1982. — С. 8—40.
19. *Кара-Мурза С. Г.* Советская цивилизация от начала до Великой Победы. — М.: Эксмо, Алгоритм, 2005. — 640 с.
20. *Кузанский Н.* Сочинения в двух томах. Том 1 / Ред. З. А. Тажуридина. — М.: Мысль, 1979. — 488 с.
21. *Кимелев Ю. А., Полякова Н. Л.* Наука и религия: Историко-культурный очерк. — М.: Наука, 1988. — 176 с.
22. *Зубов В. П.* Развитие атомистических представлений до начала XIX века. — М.: Наука, 1965. — 372 с.
23. *Фрагменты ранних греческих философов. Ч. I.* От этических теокосмогоний до возникновения атомистики. — М.: Наука, 1989. — 576 с.
24. *Бауэр Ф., Гооз Г.* Информатика: вводный курс. — М.: Мир, 1976. — 486 с.

Вадим Глебович Кнорринг — д-р техн. наук, профессор кафедры Измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

☎ (812) 247-60-01

□