

ЕЩЕ РАЗ О СИЛАХ ИНЕРЦИИ¹⁾в связи со статьей А. Н. Крылова²⁾**Л. И. Мандельштам**

Трудности, которые возникают в вопросе о так называемых силах инерции, связаны главным образом с двумя моментами: 1. Рассматривают сплошные тела, например: маховик, нить и т. д. (при этом и связи осуществляются тоже сплошными телами), а применяют терминологию «точечной» механики. 2. Рассматривают связи как абсолютно жёсткие.

По существу, конечно, никаких сил инерции нет, ни реальных, ни фиктивных. Однако, ввиду установившегося обычая нужно сказать и о том, как можно безвредно понимать этот термин.

Нужно отметить, что вводило в заблуждение то обстоятельство, что у Ньютона в «Principia» есть следующее место: «Определение III. Врождённая сила материи есть присущая ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает своё состояние покоя или равномерного прямолинейного движения. Эта сила всегда пропорциональна массе и если отличается от инерции массы, то разве только воззрением на неё». «От инерции массы происходит, что всякое тело лишь с трудом выводится из своего покоя или движения, поэтому врождённая сила могла бы быть весьма вразумительно названа силой инерции...»³⁾.

Всё это мало что говорит. Насколько я помню, Максвелл в «Материи и движении» подверг это место критике. Во всяком случае выводить отсюда что-нибудь о «реальности» или «фиктивности» сил инерции нельзя. Повидимому, однако, начало всего спора — это место у Ньютона.

¹⁾ Обработано по черновикам рукописи М. А. Леонтовичем.

²⁾ А. Н. Крылов, О силах инерции и начале Даламберта, (в книге: А. Н. Крылов, Мысли и материалы о преподавании механики. Издательство Академии наук СССР, Москва — Ленинград, 1943).

³⁾ Перевод А. Н. Крылова. Подчёркнуто Л. И. Мандельштамом.

Не выдерживает, конечно, критики такая «аргументация» о реальности сил инерции: маховик разрывается, значит силы инерции реальны. С тем же правом можно сказать: «Накачивая воздух, мы можем разорвать котёл. Нагревая воздух — тоже. Значит, при нагревании мы прибавляем что-то в котёл, то-есть теплота — вещество!».

Начну с движения планеты вокруг солнца. На планету, движущуюся приблизительно по кругу, действует сила притяжения солнца. Согласно третьему закону Ньютона, на солнце действует такая же по величине сила притяжения планеты, направленная в обратную сторону. Никакие другие силы здесь не действуют. Можно назвать первую силу в данном случае центростремительной, а вторую — центробежной. Но это только другое название для ньютоновских сил притяжения, а не какие-то новые силы, и, поскольку мы считаем, что название не влияет на сущность дела, вопрос о «реальности» центробежной силы беспредметен.

Обратимся к шарiku, движущемуся по кругу и удерживаемому ниткой. Шарик будем считать точкой с массой m . Тогда по Ньютону действует сила (конечно, реальная, вызванная растяжением нити), направленная к центру. Она равна массе, умноженной на ускорение: $m\ddot{r}$. Далее аргументируют так: по третьему закону Ньютона действие равно противодействию; значит, на конец нити действует сила $m\ddot{r}$, направленная от центра. Эту силу называют силой инерции. Это — сплошное недоразумение. Целесообразно рассуждать одним из двух способов: либо 1) рассматривать нить как состоящую из дискретных материальных точек, либо 2) рассматривать нить как сплошное тело.

Разберём сначала первый из этих способов и для простоты в качестве модели нити возьмём одномерную цепочку точек (рис. 1). O — неподвижный центр, m — материальная точка, остальные точки

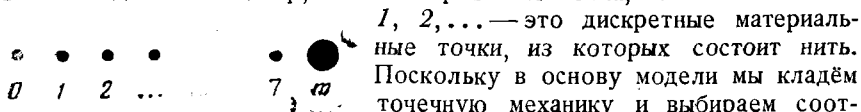


Рис. 1.

$1, 2, \dots$ — это дискретные материальные точки, из которых состоит нить. Поскольку в основу модели мы кладем точечную механику и выбираем соответствующую модель, постольку мы должны принять, что силы, действующие между соседними точками, действуют «на расстоянии», в том же смысле, как солнце действует на планеты. Тогда случай шарика на нити отличается от случая движения планеты вокруг солнца только тем, что здесь много точек, и законом, по которому сила зависит от расстояния. Точно так же как при движении планеты вокруг солнца нецелесообразно и не принято говорить, что на солнце действует со стороны земли центробежная сила, и здесь нет никакого основания говорить, что на точку 7 (рис. 1) действует центробежная сила. Во всяком случае принципиально (за исключением разной зависимости силы от расстояния) между этими двумя случаями нет никакой разницы.

При втором способе рассмотрения мы представляем себе связи как сплошные тела. Здесь целесообразно не делать различия между материальной точкой и нитью, а положить в основу сплошной стержень, как на рис. 2. Случай нити с шариком — только частный случай типа, скажем, изображенного на рис. 3. При этом способе рассмотрения



Рис. 2.

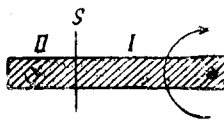


Рис. 3.

нужно ввести понятие о напряжениях в теле и поступать соответственно третьему закону Ньютона о равенстве и противоположности напряжений, действующих в сечении s на часть I и часть II нашего тела. Силы, соответствующие этим напряжениям, вызваны деформациями нашего тела. Это — реальные силы, ничем не отличающиеся от статических сил при тех же деформациях. Только при движении эти деформации вызваны именно тем обстоятельством, что для того, чтобы заставить стержень двигаться по кругу, нужны силы, которые обуславливаются деформациями.

Происхождение деформаций при переходе от покоя к движению совершенно очевидно (как и в дискретном случае). Отдельные точки $1, 2, \dots, m$ двигались бы, скажем, под действием толчка, по прямым (касательным). При этом движении возникают именно те деформации, которые вызывают нужные силы.

Можно и здесь для силы, действующей со стороны части I тела на часть II , ввести название центростремительной, а для силы, действующей на часть II , — центробежной силы. Я полагаю, что из вышесказанного ясно, что центробежные и центростремительные силы — лишь другое название для обычных сил (упругих междомолекулярных сил или сил притяжения). Ясно также, насколько беспредметен разговор об их реальности или нереальности. Те же самые силы, которые мы считаем силами всегда, а именно, как сказано, упругие междомолекулярные силы и силы притяжения, иногда начинают называть центробежными.

Можно поставить вопрос — рационально ли такое наименование вообще или имеются ли случаи, когда оно рационально. Как-никак термин «центробежная сила», особенно в технике, укоренился. Есть ли для этого основание? Я думаю, что да, и вот почему и когда.

В тех случаях, когда — как в случае планеты — требуется найти движение по заданным силам; название центробежная или центростремительная сила в лучшем случае излишне. Но бывают другие случаи, когда в движении участвуют тела, чрезвычайно мало деформируемые, другими словами, — тела, в которых силы или напряжения настолько быстро растут с изменением междомолекулярных расстояний или деформаций, что мы знаем заранее с достаточно большой точностью из-

вестные характеристики движения. Например, хотя (с физической точки зрения) нет нерастяжимых нитей и абсолютно жёстких тел, но есть нити и твёрдые тела, которые дают настолько большие силы при таких малых растяжениях, что мы длину этих нитей можем считать постоянной. Значит, например, мы заранее знаем, что привязанный на такой нити шарик будет двигаться по кругу. На этом основана громадная ценность введения жёстких связей в аналитической механике. Пусть в случае движения шарика на такой нити нам ещё дана тангенциальная скорость. Это задание и практическая нерастяжимость нити определяют движение. При этом мы не знаем и не имеем необходимости знать деформации и поэтому мы лишены возможности из деформаций определить важные для нас натяжения в нити.

В этом случае мы определяем эти силы натяжения при помощи второго закона Ньютона из ускорений, которые мы знаем, так как знаем движение. Вот в этих случаях может быть в известной мере оправдано название по существу обычных упругих сил силами центробежными или центростремительными. Здесь эти названия выражают способ их расчёта по центробежным или центростремительным ускорениям. Но больше этого вкладывать в эти названия нельзя.

Правда, есть ещё одно оправдание для введения термина «сила инерции», даже в таком случае, как движение планеты. Но это — нечто другое. Дело в том, что когда хотят свести задачу динамики на задачу статики, то так как в статике условия равновесия формулируются для сил, то и в динамике стараются назвать некоторые выражения силами, чтобы применить дословно условия статики. Именно, если я назову — mj силой инерции, действующей на самую массу, а не как обычно говорят — на связь, то уравнения движения получаются из следующего принципа. Назовём ещё $\pi = F - mj$, т. е. сумму действующей силы и силы инерции, потерянной силой. Тогда для нахождения уравнений движений нужно выразить, что система точек под действием потерянных сил, приложенных к ним, при заданных связях находится в равновесии. Здесь термин «сила инерции» — это просто название величины — mj . Это другое, чем то, что мы называли силой инерции ($\equiv$ центробежной, центростремительной силой) раньше. Здесь это не сила в смысле второго закона Ньютона, а название для выражения — mj . Спор о реальности и здесь лишён смысла.
