



Аудитория лорда Кельвина в Университете Глазго, подготовленная для лекции о гиростатах.



КЛАССИЧЕСКИЕ РАБОТЫ. СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Гиростаты и волновое движение (глава 18 книги «Жизнь лорда Кельвина»)

Сильванус Ф. Томпсон¹

Явление вращения тел хорошо известно, примером может служить вращение маховика или волчка. Поэтому вызывает удивление то отставание, которое наблюдается в преподавании динамики вращения. Лишь немногие современные учебники механики сообщают что-либо о крайне важном принципе сохранения положения оси вращения при стационарном движении. Именно этот эффект позволяет волчку сохранять вертикальное положение, сохраняет направление винтовочной пули в ее смертоносном полете и удерживает земную ось в направлении на небесный полюс. Такая «научная игрушка», как гироскоп, — тяжелый волчок, вращающийся между подшипниками, установленными в карданном подвесе, может в течение часа рассказать об этом больше, чем страницы ученых трудов. Гироскоп стал широко известен в 50-х годах XIX века в результате исследований Фуко, однако гораздо раньше принцип его действия изучали в Кембридже Эйри и Ирншоу. Следствиями указанного принципа постоянства оси вращения являются странная устойчивость вращающегося диска, стремление его оси повернуться вправо или влево, когда к нему приложена сила, пытающаяся повернуть его вверх или вниз, видимая определенность, с которой его ось всегда устанавливается в одном и том же направлении, когда несущий его человек двигается или поворачивается.

Еще в студенческие годы лорд Кельвин и его друг Хью Блэкберн были увлечены проблемой вращения, и когда они вместе готовились к важному экзамену по математике, они провели неделю на морском побережье, наблюдая вращение волчков и круглых камней, которые они находили на пляже в Кромере. Невращающийся волчок или камень яйцевидной формы при попытке установить их вертикально сразу падали. Но будучи закрученными, они стремились сохранить вертикальное положение и сопротивлялись попыткам опрокинуть их. Более того, если закрутить яйцевидный камень на его боковой стороне, он сам стремился встать вертикально и крутиться на своем конце. Почему возникает такая устойчивость? Почему быстро вращающееся тело приобретает явную способность сопротивляться внешним воздействиям, которой оно ранее не обладало? В течение всей научной жизни

Silvanus Ph. Thompson, *The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs: Vol. II*, London: McMillan and Co., 1910. Chapter XVIII: Gyrostatics and Wave Motion, pp. 736–752. Перевод с английского Э. М. Эпштейна.

¹Томпсон, Сильванус Филлипс [Silvanus Phillips Thompson] (1851–1916) — английский физик, биограф лорда Кельвина. — *Прим. НД.*

лорда Кельвина неотвязно преследовали вопросы, связанные с этой квазижесткостью, приобретаемой телами в результате вращения. Как видно из его эссе о фигуре Земли, он уже в 15-летнем возрасте был знаком с математикой вращающихся тел и, как отмечает Николь, с теорией пар Пуансо. В 1846 году он написал математическую заметку об оси вращения твердого тела (впоследствии включенную в трактат Томсона и Тэта, §§ 282–284²). Таким образом, он определенно был знаком с теорией прецессии Даламбера. Земная ось, будучи в основном ориентирована в постоянном направлении, в течение столетий медленно поворачивается, подобно тому как ось наклонно вращающегося волчка медленно «прецессирует», подчиняясь направленной вниз силе тяжести. В случае Земли прецессию оси вращения вызывает воздействие Солнца и Луны на выступающую экваториальную часть. Томсон, с его инстинктивной способностью вникать в суть вещей, разработал заново теорию прецессионных сил и исправил формулы динамики для пар сил, определяющих движение оси вращающегося тела. Увлеченный этими исследованиями, он изобрел новые формы волчков и модели гироскопов. Один из таких гироскопов был в 1863 году продемонстрирован Гельмгольцу в действии — и с плачевными последствиями для его шляпы. Всем этим весьма поучительным игрушкам Томсон дал общее название *гироскоп*. Гироскоп — это просто тяжелый, хорошо сбалансированный маховик с тонкой осью, подобный ранее известному гироскопу, но помещенный в полый металлический корпус, внутри которого он вращается. Такая конструкция позволяет проводить эксперименты, которые трудно осуществить с прежней моделью, смонтированной на карданном подвесе. В одной из своих конструкций Томсон смонтировал гироскоп внутри концентрического кольца, так что он мог стоять на краю или кататься по поверхности стеклянного листа. Другие устанавливались на опорах или подвешивались, чтобы могли проявляться различные степени свободы. Многочисленные эксперименты были описаны в журнале «Nature» от 1 февраля 1877 года³, они упоминаются также в длинном абзаце, добавленном к первой части первого тома «Трактата» Томсона и Тэта (§ 345) при его переработке для второго издания 1879 года. За 20 лет до этого Пьяцци Смит предложил использовать гироскоп, чтобы стабилизировать платформу для астрономических наблюдений на борту корабля, однако Томсон теперь продемонстрировал, что вращающийся гироскоп не только стремится сохранять неизменной ось вращения, но и проявляет при этом замечательную квазиупругость. Если нанести удар по его раме, то он начинает вибрировать наподобие жесткой пружины и возвращается в прежнее положение. С этого времени важным предметом исследования становится *динамическая устойчивость* (восстановление положения вследствие реакции движущейся массы) и *гироскопическое доминирование* (воздействие на систему любых вращающихся масс внутри нее). Излюбленный эксперимент, демонстрируемый посетителям лаборатории, проводился с гироскопом, заключенным в корпус, с вертикальной осью вращения; корпус с помощью горизонтальных цапфовых подшипников соединялся с квадратной деревянной рамой, позволяющей переносить прибор. Если экспериментатор, держа в руках прибор, шел по прямой линии или поворачивался в том направлении, в котором вращался маховик, ничего не происходило. Если же он поворачивался как-то по-другому, гироскоп, словно заколдованный, немедленно переворачивался в своем подвесе «вверх ногами». Были показаны и многие другие занятные эксперименты, в которых гироскопы, видимые или спрятанные, сохра-

²W. Thomson, P. G. Tait, Treatise on Natural Philosophy, Part I. (Рус. перев.: Томсон У. (лорд Кельвин), Тэт П. Г. Трактат по натуральной философии. Часть 1. М.–Ижевск: НИЦ «РХД», ИКИ, 2010. — Прим. НД.)

³Перевод этой статьи см. на с. 155–159 этого номера. — Прим. НД.

няли равновесие в странных положениях или их ось покачивалась в условиях прецессии, имитируя тем самым явление нутации, известное в астрономии. Все эти странные эффекты, поддающиеся математическому расчету, очаровывали Томсона, которого увлекало изучение такого причудливого поведения.

Учитывая то значение, которое рассматриваемые вопросы могли иметь для физики Земли, Томсон сконструировал жидкие термостаты в виде эллипсоидальных, сплюснутых или вытянутых, металлических оболочек, заполненных водой. Вращение сплюснутого эллипсоида вокруг его оси симметрии оказалось устойчивым, а вытянутого — неустойчивым. Сваренное вкрутую яйцо, если поставить его на острый конец и закрутить, будет, подобно волчку, сохранять свое положение. Если закрутить его на боковой стороне, оно поднимется и будет крутиться, стоя на своем конце. Однако заставить вращаться подобным образом сырое яйцо никак не получится. Это был излюбленный лекционный эксперимент. Однажды некий озорной студент тайком проник в аудиторию перед лекцией и заменил приготовленную для демонстрации пару яиц — вареное и сырое — двумя сырыми яйцами. Когда же наступил решающий момент и злоумышленники, затаив дыхание, ждали результатов своей диверсии, сэр Уильям, попробовав закрутить оба яйца, вынес безапелляционный вердикт: «Оба они сырые».

Другой опыт лорда Кельвина с яйцом состоял в следующем. Закрутим яйцо на его боковой стороне. Затем на мгновение коснемся его пальцем, чтобы остановить вращение. Если яйцо вареное, то после того, как мы отнимем палец, оно останется лежать неподвижно, если же яйцо сырое, оно продолжит вращаться, потому что хотя скорлупа остановлена, жидкое содержимое внутри нее будет продолжать движение и увлекать твердую оболочку после того, как мы убрали палец.

В 1875 году Кельвин представил в Эдинбургское Королевское общество теорию волчка, объясняющую его подъем⁴ из наклонного положения в вертикальное, в котором оно «застывает». Его объяснение, что этот эффект связан с трением в закругленном конце, предвосхитил, однако, Джеллетт в 1872 году.⁵

Однако динамическую жесткость проявляют не только вращающиеся волчки.

Следующая история, произошедшая в 1868 году, была рассказана оптиком Джеймсом Уайтом. Томсон посетил Стэррока, модного парикмахера на Бьюкенен-Стрит в Глазго, вблизи магазина Уайта. У Стэррока он увидел бесконечную вращающуюся каучуковую ленту, служащую для приведения в движение вращающейся щетки для волос. Освободившись, он сразу зашел в магазин Уайта и заявил: «Уайт, следуйте за мной». Не вдаваясь в объяснения, он привел Уайта к Стэрроку и, приведя бесконечную ленту в движение и ударив по ней, продемонстрировал Уайту жесткость формы, которую она приобретает вследствие своего движения. «Немедленно устройте такое в моем классе в Колледже!» — сказал он и вышел. Через несколько дней такая лента была установлена, и старшие студенты помнят тот восторг, с которым Томсон демонстрировал ее им, а вскоре и Тэту, приехавшему из Эдинбурга. Он сильно ударял палкой по нижнему концу петли, заставляя ее принимать разные, порой фантастические, формы, которые могли сохраняться в течение нескольких минут. Томсон был глубоко погружен в проблемы динамической устойчивости, именно поэтому его

⁴«Ускорьте прецессию, и тело будет подниматься вопреки силе тяжести» и «Замедлите прецессию, и тело будет опускаться, так как сила тяжести будет действовать на него, как если бы оно не вращалось» — это два из афоризмов Томсона. Роль трения в опорном конце состоит в ускорении прецессии.

⁵J. H. Jellett, A Treatise on the Theory of Friction. Dublin: McMillan, 1872. (Рус. перев.: Дж. Х. Джеллетт. Трактат по теории трения. М.–Ижевск: НИЦ «РХД», ИКИ, 2009. — *Прим. НД.*)

привлекла эта лента. Он придумал много других экспериментов, демонстрирующих аналогичные случаи квазижесткости, создаваемой движением. Круглый диск из тонкой бумаги, быстро вращающийся вокруг центра, становился таким жестким, что сопротивлялся удару кулаком и звучал при ударе. Профессор Перри, бывший студентом Томсона в 70-х годах, описал большинство таких явлений в своей замечательной лекции о вращающихся волчках.⁶

Сэр Уильяма Томсона осенила мысль, что квазижесткость вращающихся тел имитирует такое свойство вещества, как упругость, и что можно даже попробовать объяснить само явление упругости, предположив, что молекулы, или некоторые из них, находятся в состоянии вращения. Он представил себе цепочку связанных между собой вращающихся гиростатов и отправил в несколько научных обществ⁷ математическое описание свойств растянутой цепочки из гиростатов, вдоль которой может распространяться волна, как вдоль растянутого упругого шнура. Тогда становится очевидным, что если вращающийся маховик может вести себя подобным образом, то крутящаяся вихревая нить в вязкой жидкости также может обладать квазиупругостью, поскольку совершает вращение. В самом деле, нечто подобное наблюдается в отражении дымовых колец от препятствия. Часть исследований статики вихрей была связана с этой идеей. Также и эффект «воздушной пружины» в кинетической теории газов, открытый Робертом Бойлем двумя веками раньше, интерпретировался как проявление беспорядочного движения бесчисленного множества частиц, сталкивающихся между собой; эта теория была развита Джоулем, Клаузиусом и Максвеллом. Но если это верно, то молекулы или атомы сами должны быть упругими телами, а не теми бесконечно твердыми объектами, какими они предполагались раньше.

В ноябре 1880 года сэр Уильям согласился выступить с лекцией в Королевском институте. На вопрос д-ра Де ла Рю о предмете лекции он ответил:

Дорогой сэр! Темой моей лекции может быть «Об упругости, рассматриваемой как возможный способ движения», если только Тиндаль не запатентовал эту тему и не откажется выдать мне лицензию!

Искренне Ваш, У. Томсон.

Эта лекция состоялась 4 марта 1881 года. Первая фраза звучала так:

Уже само название замечательной книги д-ра Тиндаля «Теплота, рассматриваемая как род движения» содержит глубокую и универсальную истину, представляющую одно из величайших открытий современной философии. Я всегда восхищался этим учением и жаждал применить его к явлению упругости. И вот сейчас, с любезного разрешения автора, я воспользуюсь им в своей лекции.

Томсон начал с утверждения, что данная гипотеза не может считаться вполне надежной, пока не будет доказано, что упругость самих молекул является следствием их движения, и вся его лекция направлена на то, чтобы обратить внимание на такую возможность. Он обратился к хорошо известным примерам устойчивости волчка, катящегося обруча, движущегося велосипеда, дымовых колец и гиростатов. Он показал, что гибкая бесконечная стальная цепь, крутящаяся вокруг вращающегося шкива, будучи внезапно положенной на платформу, встает наподобие обруча и катается по платформе, пока ее движение

⁶Лекция была опубликована Обществом по распространению христианских знаний в 1890 году. (См. также: Дж. Перри. Вращающийся волчок. М.–Ижевск: НИЦ «РХД», 2001. 112 с. — *Прим. НД.*)

⁷*Proc. Lond. Math. Soc.* VI, p. 190, April 1875; *Proc. Roy. Soc. Edin.* VIII, p. 521, April 1875.

не прекратится из-за трения и столкновений. Крутящаяся масса воды во вращающейся вазе также приобретает упругость, как если бы это было желе. «Нельзя ли подобным образом объяснить упругость каждого мельчайшего атома вещества?» — спрашивал он, но тут же добавлял: «Но такая кинетическая теория материи — пока лишь мечта, и она не может быть создана, пока не получат полного объяснения химическое сродство, электричество, магнетизм, гравитация и инерция скопления вихрей». Перечислив трудности, Томсон закончил на оптимистической ноте: «Вера в то, что никакая другая теория материи невозможна, позволяет надеяться, что в книжных магазинах всего мира появится другая прекрасная книга под названием “Упругость, рассматриваемая как род движения”».

Двумя годами позже в статье, представленной в Эдинбургское Королевское общество, Томсон провел математическое исследование гиростатических систем и показал, что любую идеальную систему материальных частиц, соединенную с другой такой же системой безмассовыми пружинами, можно точно имитировать моделью, состоящей из соединенных между собой жестких звеньев и быстро вращающихся маховиков, опирающихся на некоторые или все звенья. Так он моделировал материю, обладающую жесткостью, но абсолютно лишенную упругости, — идеальную модель пружинных весов.

Но это еще не всё. Томсон увидел также, что с помощью гиростатических моделей можно имитировать явление магнетизма и даже сконструировать гироскопический компас, который, в отличие от магнитного, будет всегда указывать на истинный Северный полюс вращающегося земного шара. Его любимым экспериментом было поставить гиростат наклонно на палец, поместить поверх его другой гиростат, наклоненный под другим углом, а поверх второго — третий гиростат, так что получалась кривая цепочка из гиростатов. Но на этом Томсон не остановился: он нашел возможность соединить гироскопические элементы так, чтобы они образовывали сетку или ткань, на которой можно имитировать распространение поперечных волн в мировом эфире.

Gyrostatics and wave motion (Chapter XVIII of “The Life of William Thomson”)

Silvanus Ph. Thompson

Citation: *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2012, vol. 8, no. 1, pp. 149–153 (Russian)

Originally published in: Silvanus Ph. Thompson, *The Life of William Thomson, Baron Kelvin of Largs: Vol. II*, London: McMillan and Co., 1910. Chapter XVIII: Gyrostatics and Wave Motion, pp. 736–752.