Астахов Александр Алексеевич

Физика вращения

Ставрополь 2006 г.

СОДЕРЖАНИЕ.

ВВЕДЕНИЕ.

Настоящая работа посвящена анализу физической сущности вращательного движения.

Работая над проблемой частых сбоев счетчиков газа кориолисового типа, нам пришлось вспомнить теорию вращательного движения, с которым в основном, и связано проявление силы Кориолиса.

Мы вдруг с удивлением для себя поняли, что знакомая из школьного курса физики теория вращения не дает ответов на основные вопросы вращательного движения.

Что вообще такое и как образуется центростремительное ускорение в отсутствии движения к центру? Что такое и как образуется центробежная сила? Как происходит поворот вектора линейной скорости?... и многие другие.

Ни в учебной литературе, ни в научной литературе, ни в публикациях современных авторов мы не нашли удовлетворительных ответов на интересующие нас вопросы.

Работ, посвященных вращению очень много, но все они по большому счету в той или иной степени повторяют друг друга, так и не раскрывая сущности вращения тел.

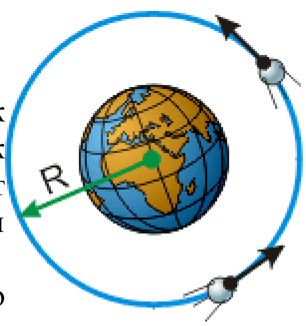
Мы попытались разобраться в физической сущности вращательного движения без привлечения математических понятий, которые нисколько не добавляют понимания физики процесса.

Мы не претендуем на истину в последней инстанции и предлагаем обсудить проблему совместно с заинтересованными специалистами.

1. ФИЗИКА ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ.

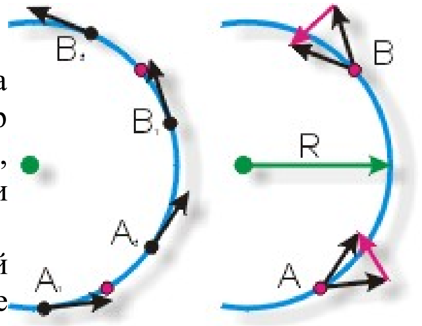
(Учебник "Физика-9" Тема 13. Введение в кинематику)

§ 13-л. Центростремительное ускорение



Рассмотрим спутник, летящий по круговой орбите вокруг Земли. Так как спутник летит равномерно, значит, его скорость не изменяется по величине. Но так как спутник летит по окружности, то вектор его скорости непрерывно меняет направление. Итак, несмотря на постоянство скорости по величине, вектор скорости изменяется. Следовательно, существует ускорение.

Найдем, куда направлен вектор ускорения спутника в точках А и В. Для этого сделаем схематичный чертеж, обозначив Землю зеленой точкой, а спутник – красной.



Чтобы найти вектор ускорения, выберем вблизи положений спутника А и В пары точек A_1, A_2 и B_1, B_2. Изобразим в каждой из них вектор скорости спутника (левый чертеж). Пользуясь правилом треугольника, совместим начала векторов и проведем красным цветом вектор разности (правый чертеж).

Как видите, вектор разности скоростей, а, значит, и сонаправленный с ним вектор ускорения спутника направлен к центру окружности, где расположена Земля. Именно поэтому ускорение и называется центростремительным. Итак, тело, равномерно движущееся по окружности, имеет ускорение, вектор которого направлен к центру этой окружности.

Центростремительное ускорение можно вычислять по формуле

$a = \Delta V/\Delta t$

однако при равномерном движении по окружности проще воспользоваться формулой

$a = V^2_л/R$

Она выводится из геометрических построений. Они достаточно громоздки, и мы не будем их рассматривать.

(О. Ф. Кабардин «ФИЗИКА» МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991)

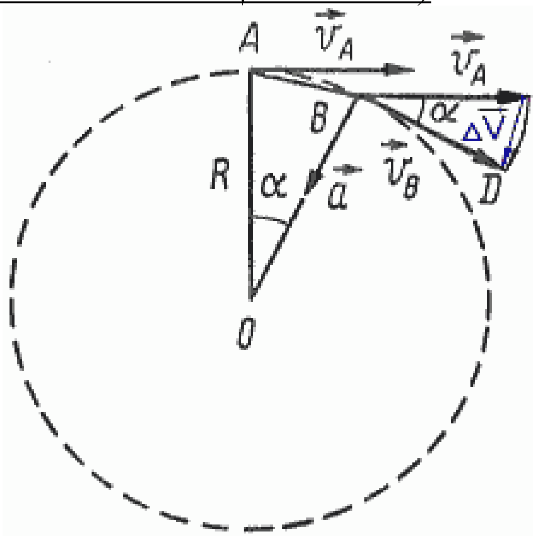


Рис. 17

Определим ускорение тела, движущегося равномерно по окружности радиусом R. За интервал времени Δt тело проходит путь $\Delta s = v * \Delta t$.

Для нахождения вектора ускорения а нужно найти разность векторов скорости $\Delta v = v_B - v_A$ и определить отношение изменения скорости к малому интервалу времени Δt, за который произошло это изменение:

$a = \Delta v / \Delta t$

из подобия треугольников ОАВ и ВСД следует:

ОА / АВ = ВС / СД (3.1)

Если интервал времени мал, то мал и угол α. При малых значениях угла α длина хорды АВ примерно равна длине дуги АВ, т.е. $AB \approx v * \Delta t$ и $СД = \Delta v$. То из выражения (3.1) получаем:

$R / v * \Delta t \approx v / \Delta v$ (3.2)

$\Delta v = v^2 * \Delta t / R$ (3.3)

Поскольку

$a = \Delta v / \Delta t$ (3.4)

из выражений (3.3) и (3.4) получаем:

$\boldsymbol{a = v^2 / R}$

Классическая физика утверждает, что чем меньше угол альфа, тем ближе направление вектора (ΔV) к направлению на центр окружности (О), следовательно, *«центростремительное ускорение равное отношению вектора (ΔV) к интервалу времени (Δt) при условии, что интервал времени очень мал, направлено на центр (О)»*. Однако из рисунка 17 видно, что вектор (Δv) приближается к направлению на центр окружности только потому, что вектор (v_A) при стремлении (Δt) к нулю приближается к направлению вектора (v_B) и соответственно к направлению касательной.

(нумерация формул и рисунков оригинальная)

Вращательное движение. Равномерное движение точки по окружности. Вектор угловой скорости. Угловое ускорение

При равноускоренном движении частица движется все время в одной плоскости, образуемой начальным вектором скорости **v**(0) и постоянным ускорением **a** (докажите это). Однако очевидно, что далеко не всякое плоское движение является равноускоренным.

Пример плоского неравноускоренного движения, известный вам из школьного курса физики, — это **равномерное движение по окружности**. Давайте рассмотрим его здесь. Поскольку это движение плоское, выберем в качестве этой плоскости, плоскость XY. Начало координат выберем в центре окружности (рис. 1).

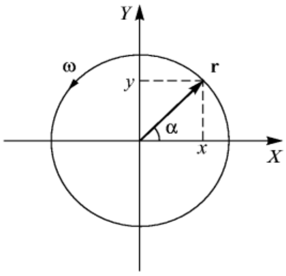


Рис. 1. Равномерное движение по окружности

Координаты частицы выразим через величину радиуса окружности r и угол α:

$x = r*\cos\alpha$

$y = r*\sin\alpha$ (1)

Поскольку движение происходит по окружности, r от времени не зависит. Функцией времени является только угол α(t). Производная от угла по времени называется угловой скоростью вращения ω:

$\omega = d\alpha(t)/dt$ (2)

При равномерном вращении по окружности ω=const и можно проинтегрировать это уравнение. В результате

$\alpha = \omega*t + const$ (3)

Константа интегрирования выбирается из условия α(0)=0. Таким образом,

$x(t) = r*\cos(\omega*t)$

$y(t) = r*\sin(\omega*t)$ (4)

Это **полностью** определяет движение. Так, скорость материальной точки определяется производными по времени от координат:

$V_x = dx/dt = -\omega * r * \sin(\omega*t)$

$Vy = dy/dt = \omega * r * \cos(\omega*t)$ (5)

Скалярное произведение равно :

$\mathbf{r * v = x* Vx + y * V_y} = r * \cos(\omega*t) * (-\omega * r * \sin(\omega*t) + r * \sin(\omega*t) * (\omega * r * \cos(\omega*t)$ (6)

что означает перпендикулярность векторов **r** и **v**, то есть скорость действительно направлена по касательной к окружности. Абсолютная величина скорости равна:

$|V| = \sqrt{V_x + V_y} = \sqrt{\omega^2 * r^2 * \sin^2(\omega*t) + \omega^2 * r^2 * \cos^2(\omega*t)} = \omega * r = const$ (7)

она не зависит от времени, движение действительно равномерное (но по окружности).

Дифференцируя по времени скорость, мы можем определить ускорение:

$a_x = dV_x/dt = -\omega^2 * r * \cos(\omega*t)$

$a_y = dV_y/dt = \omega^2 * r * \sin(\omega*t)$ (8)

откуда следует, что ускорение зависит от времени, то есть движение не является равноускоренным. Абсолютная величина ускорения (модуль), тем не менее, остается постоянной:

$a = |a| = \sqrt{a_x + a_y} = \omega^2 * r$ (9)

или, так как ω*r=V, то мы получаем:

$|a| = V^2/r$ (10)

- известную из школьного курса физики формулу для центростремительного ускорения. Почему центростремительного? Да потому, что вектор **a** направлен к центру. В этом нетрудно убедиться, подсчитав скалярное произведение:

$\mathbf{a*r = a_x * x} + a_y * y = -(\omega^2 * r * \cos(\omega*t)) * r * \cos(\omega*t) + (-\omega^2 * r * \sin(\omega*t)) * r * \sin(\omega*t) =$
$= -\omega^2 * r^2$ (11)

С другой стороны,

$\mathbf{a}*\mathbf{r} = |\mathbf{a}|*|\mathbf{r}| * \cos(\mathbf{a}\hat{}\mathbf{r}) = \omega^2 * r^2 * \cos(\mathbf{a}\hat{}\mathbf{r})$ (12)

Из сравнения двух этих выражений получаем, что $\cos(\mathbf{a}\hat{}\mathbf{r})= -1$. Таким образом, вектор ускорения антипараллелен вектору **r**, то есть направлен к центру. В результате картина направлений векторов выглядит, как показано на рис. 2.

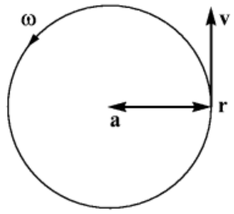


Рис. 2. Радиус-вектор, скорость и ускорение материальной точки при равномерном движении по окружности.

До сих пор при рассмотрении вращательного движения мы оперировали проекциями векторов на оси координат. Между тем, часто бывает полезно иметь соотношения, не зависящие от выбора системы координат, или, как говорят, записанные в **векторной форме**. Примером таких соотношений является выражение для координаты и скорости частицы при равноускоренном угловую скорость вращения (ω) как производную по времени от угла поворота α: ω=dα/dt. Давайте движении (см. лекцию 2).

При рассмотрении вращательного движения мы ввели теперь зададимся вопросом, какой величиной, скалярной или векторной, является угол поворота. Ведь когда говорят о повороте, нужно указывать не только величину угла поворота, но и то, вокруг какой оси происходит вращение (поворот) и в какую сторону (по часовой стрелке или против). В разобранном выше примере осью вращения была ось z и, поскольку мы использовали правую систему координат, вращение происходило по часовой стрелке (если смотреть в положительном направлении вдоль оси z) (рис. 3).

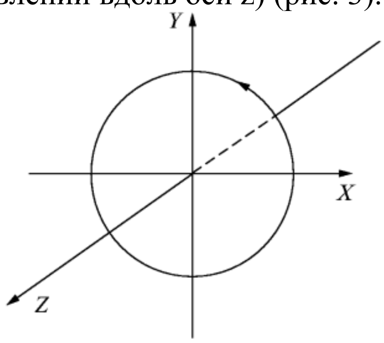


Рис. 3. Направление вращения

С этой точки зрения угол поворота должен быть величиной векторной. Однако, как мы убедимся на следующей лекции, произвольный угол поворота вектором, вообще говоря, не является. Понятие вектора применимо лишь по отношению к бесконечно малым углам поворота.

Поэтому, говоря о повороте на какой-то малый угол Δα, можно приближенно говорить о векторе Δα, величина которого равна углу поворота, а направление показывает направление оси вращения так, чтобы поворот происходил по часовой стрелке, или в соответствии с правилом буравчика. В нашем конкретном случае вектор Δα коллинеарен с направлением оси z. Зададимся вопросом, как связано перемещение материальной точки Δr при повороте ее радиус-вектора **r** на малый угол Δα (рис. 4).

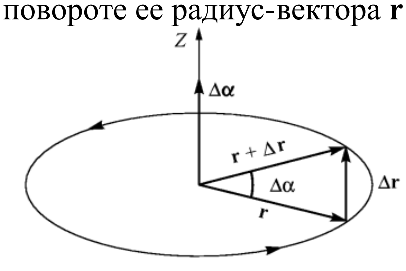


Рис. 4. Связь вектора перемещения с углом поворота

На этот вопрос легко ответить, если речь идет о бесконечно малых поворотах Δα. Тогда бесконечно малым является и перемещение d**r**. Его величина (равная длине хорды) совпадает теперь с длиной дуги, то есть

$dr = r * d\alpha$ (13)

а по направлению вектор d**r** совпадает с касательной, то есть перпендикулярен **r**. В результате мы имеем три взаимно перпендикулярные вектора **r**, d**r** и dα, образующие правую тройку (рис. 5),

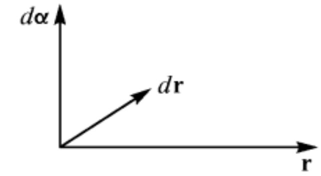


Рис. 5. Взаимная ориентация трех векторов.

причем $|dr| = |r| * |d\alpha|$. Те, кто помнят из школьного курса о **векторном произведении** векторов, без труда сообразят, что искомое соотношение можно записать в виде векторного равенства:

$$dr = [r \times d\alpha] \qquad (14)$$

Действительно, по определению, векторным произведением двух векторов A×B называется вектор:

$$C = [A\times B] \qquad (15)$$

который направлен перпендикулярно плоскости, в которой лежат (или которую образуют) два вектора **A** и **B**, в сторону от этой плоскости, соответствующую правилу буравчика (см. рис. 6).

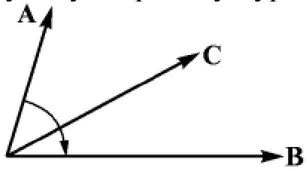


Рис. 6. Ориентация трех векторов в векторном произведении

Величина же вектора **C** равна произведению модулей векторов на синус угла между ними:

$$|C| = |A|\times|B| * \sin (A\hat{}B) \qquad (16)$$

В нашем случае угол между векторами $d\alpha$ и **r** равен 90°, так что синус равен единице. А поскольку, как мы уже писали, $|dr| = r * d\alpha$, то мы убеждаемся в справедливости векторного соотношения $dr = [r \times d\alpha]$. Разделив обе стороны этого равенства на бесконечно малый временной интервал dt, в течение которого произошло изменение вектора **r** на d**r**, мы получим

$$dr/dt = [d\alpha/dt \times r] \qquad (17)$$

Но величина, стоящая в левой части равенства, есть не что иное, как скорость частицы **v**, а производная

$$d\alpha/dt = \omega \qquad (18)$$

называется **вектором угловой скорости**. Ее мы вначале ввели по абсолютной величине, а теперь показали, что имеет смысл говорить об угловой скорости вращения как о векторе. Ее величина определяет величину угловой скорости (скорость вращения, или скорость изменения угла), а направление параллельно оси вращения, причем так, что имеет место правило буравчика. Итак, мы получили, что

$$V = [\omega\times r] \qquad (19)$$

Ориентация этих трех векторов показана на рис. 7.

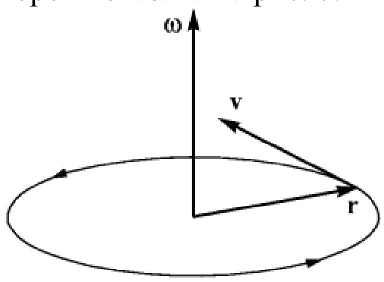


Рис. 7. Ориентация радиус-вектора, вектора скорости и угловой скорости.

Чтобы получить ускорение **a**, надо от обеих частей взять производную по времени. Если ω постоянно (как по величине, так и по направлению), то

$$A = dV/dt = [\omega \times dr/dt] = [\omega\times V] \qquad (20)$$

то есть ускорение оказывается перпендикулярным угловой скорости вращения ω и скорости движения **v**. А поскольку последняя направлена по касательной, то, значит, ускорение направлено либо параллельно **r**, либо антипараллельно. Как именно, можно выяснить, подставив в вышеприведенную формулу значение **v**:

$$a = [\omega\times V] = \omega\times [\omega\times r] = \omega*(\omega*r) - r * (\omega * \omega) = \omega*(\omega*r) - \omega^2 * r \qquad (21)$$

Поскольку в рассматриваемом нами примере начало координат выбрано в центре окружности, то угловая скорость ω и радиус-вектор **r** перпендикулярны друг другу а, следовательно, их скалярное произведение равно нулю (вообще говоря, как мы сейчас увидим, далеко не всегда $\omega\perp r$) и мы получаем

$$a = -\omega^2 * r \qquad (22)$$

то есть антипараллельность векторов **a** и **r** (вспомните термин «центростремительное ускорение»). По величине они таковы: $|a|=\omega^2*|r|$, то есть, имеем уже знакомый результат.

Вы можете спросить, зачем нам понадобилось иметь дело с векторным и с двойным векторным произведением, если мы уже разобрали движение по окружности, дифференцируя по времени проекции материальной точки на оси координат (причем получили результаты, известные со школьной скамьи). Стоит ли игра свеч? Да, стоит, во-первых, потому, что мы записали законы движения в **инвариантной**, как говорят, форме, не зависящей от выбора конкретной системы координат. Во-вторых, записанные нами соотношения справедливы и в более общем случае, когда мы рассматриваем вращение системы материальных точек или твердого тела как целого (рис. 8).

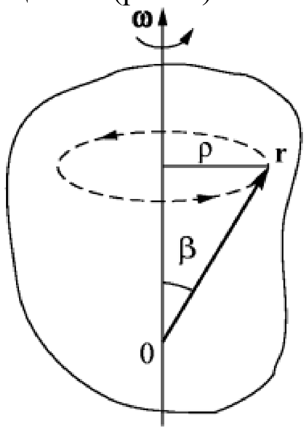


Рис. 8. Вращение твердого тела.

Имея в виду эту картину, нетрудно показать, что здесь, хотя ω и **r** не перпендикулярны друг другу, тем не менее, выполняется прежнее соотношение для скорости движения некоторой выбранной нами точки с радиус-вектором **r**:

$V = [\omega\times r]$ (23)

Действительно, как следует из рис. 8, точка движется по окружности радиуса $p=r*\sin\beta$ со скоростью $v=\omega*r=\ \omega*r\ *\sin\beta$. Но поскольку β — это угол между векторами ω и **r**, мы убеждаемся в справедливости этой формулы.

Теперь нам понятно происхождение дополнительного слагаемого в центростремительном ускорении (см. рис. 9):

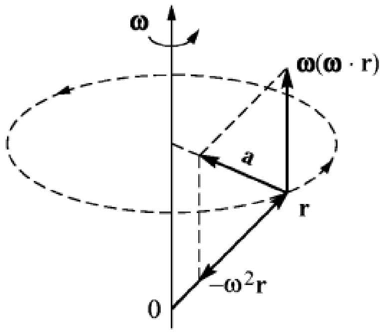


Рис. 9. Центростремительное ускорение.

$a = \omega*(\omega*r) - \omega^2 * r$ (24)

Таким образом, ускорение **a** на самом деле направлено не к центру, а к оси вращения, поэтому его можно было бы называть **осестремительным**. Но, разумеется, дело не в названиях.

В пользу соотношения $V = [\omega\times r]$ говорит и то, что оно справедливо в более общем случае, когда вектор угловой скорости ω не является постоянным и зависит от времени: ω(t). Тогда формула для ускорения изменится — в ней появится дополнительное слагаемое:

$a = dV/dt = [(d\omega/dt) \times r] +[\omega \times dr/dt] = [\beta\times r] + [\omega \times v]$ (25)

Величина $\beta = d\omega/dt$ называется **угловым ускорением**. Оно появляется, если меняется по величине угловая скорость (замедляется, например, вращение вокруг фиксированной оси) либо поворачивается с течением времени сама ось вращения (либо и то и другое).

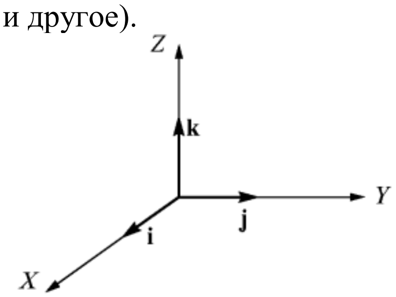


Рис. 10. Взаимное расположение единичных ортов.

В заключение для справок приведем выражение для декартовых компонент векторного произведения C = [A×B]:

$C_x = [A\times B]_x = A_y B_z - A_z B_y$, {xyz}

$C_y = [A\times B]_y = A_z B_x - A_x B_z$, {yzx}

$C_z = [A\times B]_z = A_x B_y - A_y B_x$, {zxy} (26)

Здесь для запоминания следует использовать указанные выше циклические перестановки. Эти соотношения легко доказываются, если записать каждый вектор в виде

$A = A_x i + A_y j + A_z k$ (27)

и, аналогично, вектор **B**. Затем следует учесть, что векторные произведения единичных ортов **i**, **j** и **k** между собой равны соответственно (см. рис. 10)

$[i\times j] = k,\quad [k\times i] = j,\quad [j\times k] = i$ (28)

и что при изменении порядка сомножителей изменяется знак векторного произведения:

$[i\times j] = - [j\times i]$ и т. д. (29)

Далее нужно произвести векторное умножение

$[A\times B] = [(A_x i + A_y j + A_z k) \times (B_x i + B_y j + B_z k)]$ (30)

воспользовавшись приведенными выше правилами.

(нумерация формул и рисунков оригинальная)

Выше приведен краткий обзор учебной и научной литературы, в которой изложен взгляд современной классической физики на вращательное движение. С точки зрения классической физики основным условием вращательного движения является центростремительное ускорение, которое изменяет направление вектора линейной скорости движущегося по окружности тела без изменения его величины. Считается, что абсолютная величина вектора линейной скорости при равномерном вращении постоянна. По нашему мнению это не совсем так. Изменение направления скорости невозможно без изменения её величины. Процесс изменения направления скорости можно рассматривать как преобразование величины скорости в новом направлении. При этом происходит уменьшение величины скорости в прежнем направлении движения и увеличение скорости в новом направлении движения. Физически процесс преобразования направления движения можно упрощенно проиллюстрировать на примере отражения движущегося прямолинейно тела от отражающей поверхности.

При встрече движущегося прямолинейно тела с отражающей поверхностью перпендикулярная к отражающей поверхности составляющая скорости движения тела полностью компенсируется за счет силы упругости, возникающей при взаимодействии тела с отражающей поверхностью. При этом абсолютная величина скорости движения тела в прежнем направлении уменьшается. В момент отражения перпендикулярная к отражающей поверхности составляющая скорости движения изменяет направление на противоположное и суммируется с неизменной продольной составляющей скорости движения. В результате абсолютная величина скорости движения восстанавливается до прежнего значения, но уже в новом направлении. Таким образом, абсолютная величина скорости движения при изменении её направления после отражения в конечном итоге не изменяется, но изменение направления скорости происходит через преобразование её абсолютной величины. Причём преобразование вектора скорости по абсолютной величине при изменении его направления происходит как с положительным, так и с отрицательным ускорением, направленным вдоль вектора линейной скорости.

Подобное преобразование величины линейной скорости с некоторыми специфическими особенностями происходит, по всей видимости, в любом криволинейном движении и во вращательном движении в частности. Процесс изменения направления линейной скорости в равномерном вращательном движении состоит из множества элементарных циклов отражения. После завершения каждого цикла преобразования линейной скорости по направлению абсолютная величина вектора линейной скорости независимо от угла изменения направления остаётся неизменной, в то время как угол изменения направления линейной скорости в каждом цикле может изменяться в широких пределах в зависимости от параметров вращательного движения. Следовательно, **законченным элементарным циклом преобразования движения по направлению следует считать физический процесс преобразования движения по направлению, после завершения которого, абсолютная величина вектора линейной скорости независимо от угла изменения направления остаётся неизменной.**

В каждом цикле преобразования движения по направлению вектор линейной скорости последовательно занимает бесконечное множество направлений, каждому из которых соответствует своё значение абсолютной величины вектора линейной скорости и своё значение линейного ускорения, направленного вдоль вектора скорости. Циклы изменения направления во вращательном движении повторяются с большой частотой и имеют малую длительность. В реальном масштабе времени зафиксировать колебания абсолютной величины линейной скорости достаточно сложно. Поэтому абсолютная величина линейной скорости равномерного вращательного движения считается в современной физике величиной постоянной, а реальное ускорение вращательного движения, направленное вдоль вектора линейной скорости ассоциируется с классическим центростремительным ускорением.

Фактически классическое центростремительное ускорение, как ускорение вращательного движения является понятием академическим. Это не физическое ускорение, в каком бы то ни было направлении. Это обобщенная академическая величина, равная среднему значению абсолютных величин всех мгновенных линейных ускорений, проявляющихся в процессе преобразования движения по направлению вдоль вектора линейной скорости за один элементарный цикл преобразования движения по направлению. Для того чтобы различать обобщенное академическое ускорение, как характеристику физического процесса преобразования движения по направлению и реальное физическое линейное ускорение, в каком бы то ни было направлении, среднее ускорение законченного цикла преобразования скорости движения по направлению правильнее, на наш взгляд, называть ускорением изменения направления или просто **ускорением направления ($a_н$)**.

В классической физике приято считать, что тело движется по окружности с центростремительным ускорением под действием силы упругости связующего тела, являющейся внешней силой для движущегося прямолинейно по инерции тела. Однако тело может испытывать ускорение вдоль линии действия активной внешней силы только в том случае, если направление действия внешней силы совпадает с линией, вдоль которой проявляется пассивная сила инерции движущегося прямолинейно тела. То есть внешнее воздействие должно либо совпадать с линией движения тела, либо должно осуществляться вдоль линии, проходящей через центр масс неподвижного тела. В противном случае тело будет испытывать ускорение в направлении действия результирующей силы, равной геометрической сумме силы инерции, проявляющейся в направлении прямолинейного движения тела и внешней силы, препятствующей прямолинейному инерционному движению.

Физически ускорение всегда совпадает с мгновенным направлением результирующей силы и соответственно с мгновенным направлением скорости движения, поскольку именно сила вызывает ускорение и определяет направление движения. Нет никаких оснований, полагать, что во вращательном движении законы физики не выполняются или имеют какие-то принципиальные отличия от законов физики, определяющих другие виды движения. Активная внешняя сила в направлении центра вращения является только одной из составляющих результирующей силы, проявляющейся во вращательном движении. Следовательно, физическое центростремительное ускорение в направлении центра вращения не может быть ускорением вращательного движения и также является только одной из составляющих реального ускорения направления вращательного движения.

Приращение вектора линейной скорости по направлению (ΔV) в классической физике определяется в соответствии с векторной геометрией как длина отрезка прямой между двумя положениями вектора линейной скорости в начальный и в конечный момент бесконечно малого интервала времени. Именно так, например, определяется приращение вращательного движения у О. Ф. Кабардина (Рис. 17 «ФИЗИКА» МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991, см. выше). При этом ускорение вращательного движения определяется путём дифференцирования классического разностного вектора (ΔV) по времени. В общем случае криволинейного движения или для неравномерного вращательного движения метод дифференцирования вполне оправдан и является единственным методом определения мгновенного значения ускорения направления, т.к. определить мгновенное значение неравномерно изменяющихся величин можно только путём дифференцирования. Дифференцирование необходимо лишь для минимизации случайных погрешностей, которые возникают при определении изменяющихся по произвольному закону переменных физических величин.

В любом равноускоренном физическом процессе, в котором ускорение является величиной постоянной, в том числе и в равномерном вращательном движении ускорение может и должно быть определено простым делением приращения физической величины на интервал времени (Δt), за который произошло это приращение. При определении постоянных физических величин в любом интервале времени независимо от его величины случайные погрешности отсутствуют. Тем не менее, классическое центростремительное ускорение равномерного вращательного движения, которое является постоянной академической величиной, не может быть определено простым делением классического разностного вектора (ΔV) на интервал времени (Δt), т.к. вектор (ΔV) физически не соответствует реальному приращению линейной скорости равномерного вращательного движения.

В классической модели равномерного вращательного движения случайная погрешность, которой в принципе не может быть при определении постоянной физической величины, искусственно подменяется методической погрешностью. Методика определения физической величины, как правило, вытекает из её физической сущности. Методическая погрешность не может быть случайной и является критерием истинности определения физической величины в соответствии с её физической сущностью. Таким образом, методическая погрешность принципиально не может быть устранена дифференцированием. В классической физике методическую погрешность определения величины постоянного академического ускорения равномерного вращательного движения пытаются свести к случайным погрешностям, которые характерны только для неравноускоренного движения, как по абсолютной величине, так и по направлению.

Для математики физический смысл не является определяющим, поэтому в математике методом дифференцирования можно минимизировать любую погрешность. Однако с физической точки зрения наличие методической погрешности означает несоответствие выбранного метода определения физической величины её физической сущности. При дифференцировании разностного вектора (ΔV) может быть достигнуто только **примерное количественное** соответствие классического центростремительного ускорения реальному значению академического ускорения направления. Физический смысл классического центростремительного ускорения, как ускорения вращательного движения остаётся при этом не определённым. Более подробно методические ошибки дифференцирования рассмотрены в разделе «5.МЕТОДИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ».

Для каждого законченного цикла преобразования движения по направлению определяющим является не угол поворота вектора линейной скорости, который может быть любым, а неизменность абсолютной величины вектора линейной скорости в начале и в конце каждого цикла преобразования движения по направлению. Законченный цикл характеризуется не мгновенной величиной и мгновенным направлением физического ускорения, а обобщённой академической величиной ускорения направления за вполне определённый, а не бесконечно малый интервал времени, равный периоду повторения циклов преобразования движения по направлению. Таким образом, с учётом конечности периода преобразования движения по направлению даже в общем случае криволинейного движения, в котором вектор линейной скорости является величиной переменной не только по направлению, но и по величине дифференцирование применимо только с условием, что минимальный интервал времени не может быть меньше периода следования циклов изменения направления.

Выше мы установили, что изменение направления движения без изменения абсолютной величины скорости движения эквивалентно количественному преобразованию абсолютной величины скорости движения в новом направлении. Мерой количественного преобразования вектора скорости при изменении его направления является абсолютная величина обобщённого среднего ускорения законченного цикла преобразования движения по направлению. Таким образом, поскольку в равномерном вращательном движении постоянное по величине ускорение направления количественно учитывает изменение направления движения через преобразование абсолютной величины скорости движения, то для его определения, как постоянной по абсолютному значению физической величины, метод дифференцирования с физической точки зрения принципиально неприемлем. Ускорение направления равномерного вращательного движения, как величина постоянная, однозначно определяется в любом сколь угодно малом интервале времени, который, однако, не должен быть менее оговоренного выше периода повторения циклов преобразования движения по направлению.

Таким образом, как показано выше постоянная по абсолютному значению линейная скорость, равномерно изменяющаяся по направлению, не является переменной физической величиной, т.к. академическое обобщённое ускорение направления равномерного вращательного движения, энергетически учитывающее в своей физической структуре и изменение направления движения является величиной постоянной. Следовательно, для физики криволинейного движения случайная погрешность определения ускорения в некотором интервале времени допустима только, если переменной является абсолютное или скалярное значение физической величины, т.е. в общем случае криволинейного движения. Для правильного определения ускорения направления равномерного вращательного движения дифференцирование не требуется. Достаточно правильно с физической точки зрения определить приращение скорости равномерного вращательного движения.

В прямолинейном равноускоренном движении подобной проблемы не возникает, т.к. альтернативы определения приращения скорости прямолинейного движения в классической физике не существует. Приращение скорости прямолинейного движения может быть определено только вдоль траектории движения, на которой располагаются **все положения вектора** линейной скорости. Поэтому классический разностный вектор в прямолинейном движении соответствует реальному приращению вектора скорости прямолинейного движения. Ошибка, связанная с неправильным определением приращения скорости в прямолинейном движении исключена. И дифференцирование, и простое арифметическое деление классического разностного вектора (ΔV) в прямолинейном равноускоренном движении дают одинаковый результат. Интервал времени изменения скорости равноускоренного прямолинейного движения по вполне понятным причинам не влияет на величину его ускорения.

В криволинейном движении и в равномерном вращательном движении в частности вектор линейной скорости, направленный по касательной к траектории движения имеет бесконечное множество мгновенных направлений на любом отрезке траектории, в то время как классический разностный вектор включает только два крайних положения вектора скорости, соответствующих начальной и конечной точкам траектории криволинейного движения. Все остальные промежуточные положения вектора линейной скорости равномерного вращательного движения классический разностный вектор не учитывает. При достаточно малом интервале времени количество неучтённых положений вектора скорости сводится к минимуму. Поэтому определение ускорения равномерного вращательного движения через длину прямолинейного разностного вектора (ΔV) может быть оправдано только с математической точки зрения при условии минимизации физического несоответствия классического разностного вектора реальному приращению скорости равномерного вращательного движения в минимальном интервале времени. При этом математически может быть определено только приблизительное значение приращения скорости и ускорения равномерного вращательного движения.

Для определения ускорения направления криволинейного движения, исходя из его физического смысла необходимо, прежде всего, установить физический смысл приращения движения по направлению. Легче всего это сделать на примере равномерного вращательного движения. Выше мы уже отмечали, что изменение и величины и направления скорости движения имеют одну и ту же природу. Любое механическое преобразование движения, связанное с изменением положения тела в пространстве по любой траектории определяется одними и теми же физическими законами. С физической точки зрения механизм изменения скорости прямолинейного движения без изменения её направления принципиально ничем не отличается от механизма изменения скорости движения по направлению без видимого изменения её абсолютной величины.

Изменение направления постоянного по абсолютной величине вектора линейной скорости это преобразование величины вектора линейной скорости в новом направлении, а изменение величины вектора линейной скорости при прямолинейном движении это такое же преобразование абсолютной величины вектора линейной скорости без изменения направления, т.е. при нулевом изменении направления. Следовательно, изменение направления скорости **физически эквивалентно изменению ее величины.** Именно поэтому ускорение по изменению направления без видимого изменения величины скорости измеряется в классических единицах измерения линейного ускорения, т.е. в единицах «длины», отнесенных к квадрату времени, а не в единицах изменения «направления». Таким образом, разрешается одно из многочисленных противоречий вращательного движения, заключающееся в том, что ускорением по изменению направления скорости движения тела, т.е. мерой изменения направления «постоянной по величине» скорости является обычное линейное ускорение.

Понятие вектора, определяющего направление физической величины достаточно условно, как собственно условно и само понятие «физическая величина». При этом абсолютное значение любой физической величины определяет параметры взаимодействия материальных физических тел, **прежде всего с энергетической точки зрения.** Любые количественные параметры состояния материальных тел в пространстве, движении и времени после их взаимодействия, являются компонентами энергии взаимодействия, которая является величиной скалярной. Направление же физической величины это только вспомогательная геометрическая характеристика изменения физической величины в пространстве, движении и времени, связанная с направлением распространения какой-либо части энергии физического взаимодействия. О направлении физической величины имеет смысл говорить только в том случае, если физическая величина проявляется в каком-то одном фиксированном направлении достаточно продолжительное время, в то время как энергетический эквивалент переменной только по направлению физической величины может длительное время оставаться неизменным независимо от изменения физической величины по направлению.

В общем случае, когда физическая величина не имеет фиксированного направления во времени, имеет смысл говорить только о **мгновенном направлении** переменной физической величины. Однако мгновенное направление - это понятие скорее академическое, чем физическое. Каким бы малым не был рассматриваемый интервал времени, переменная по направлению физическая величина имеет в этом интервале времени бесконечное множество мгновенных направлений. С физической точки зрения вектор переменной по направлению физической величины не определен. В отношении изменения направления постоянной по абсолютному значению физической величины правильнее, на наш взгляд, говорить о среднем энергетическом эквиваленте процесса её преобразования по направлению, а не о каком-то конкретном линейном ускорении в конкретном направлении. Причем физическую величину, являющуюся компонентом энергетического процесса преобразования движения по направлению, на наш взгляд, правильнее считать скалярной.

Направление, как геометрическая характеристика, не является неотъемлемой частью физической величины и может только сопутствовать её изменению во времени. Любой академический эквивалент изменения физической величины должен, прежде всего, количественно отражать энергетическую сторону процесса изменения физической величины, как по абсолютному значению, так и по направлению. Направление физической величины в рассматриваемом интервале времени не всегда представляется возможным геометрически определить, однако, как мы установили выше, изменение направления движения эквивалентно количественному преобразованию абсолютного значения физической величины. Таким образом, геометрический (графический) эквивалент изменения физической величины несёт только вспомогательную информацию об изменении физической величины по направлению. Полный энергетический эквивалент изменения физической величины, в том числе и по направлению определяется изменением её абсолютной величины.

Физические величины, определяющие изменение энергетической составляющей физического взаимодействия, эквивалентной преобразованию их абсолютной величины целиком и полностью характеризуются средним значением всех изменений физической величины первого порядка во всех направлениях, в которых происходят эти изменения. По своей физической сущности такие физические величины являются скалярными и могут быть условно векторными только в том случае, если их направление в рассматриваемом интервале времени остаётся относительно неизменным. Одну и ту же по абсолютному значению физическую величину, проявляющуюся в процессе взаимодействия материальных тел, в зависимости от геометрического характера её изменения в этом взаимодействии можно считать как векторной, так и скалярной.

Бездумное отнесение той или иной физической величины к векторным величинам, когда направление считается неотъемлемой частью физической величины, приводит к серьезным физическим ошибкам. Особенно это касается обобщенных (усредненных) физических величин, таких как ускорение движения по направлению. Так, например, отнесение приращения вектора скорости криволинейного движения без изменения его величины к категории векторных величин приводит к неправильной с физической точки зрения оценке этого приращения. За приращение направления вектора линейной скорости криволинейного движения без изменения его абсолютной величины в классической физике принимается классический разностный вектор (ΔV), содержащий только два положения вектора скорости в рассматриваемом интервале времени.

С энергетической точки зрения важно учитывать все положения вектора скорости, изменяющейся в общем случае, как по величине, так и по направлению. Кривая, описанная вектором скорости, изменяющимся в общем случае, как по величине, так и по направлению учитывает каждое мгновенное значение длины вектора скорости и каждое мгновенное положение вектора скорости в пространстве, т.е. является реальным приращением скорости в общем случае любого произвольного криволинейного движения. Среднее значение ускорения, соответствующее такому приращению является энергетическим эквивалентом преобразования вектора скорости произвольного криволинейного движения, как по абсолютной величине, так и по направлению.

В криволинейном движении итоговое положение вектора линейной скорости в пространстве может вообще не измениться, например, при полном обороте тела вокруг центра вращения в равномерном вращательном движении. При этом начальное и конечное положение вектора скорости совпадают в пространстве, т.е. классический разностный вектор (ΔV) в равномерном вращательном движении при завершении полного оборота тела относительно центра вращения равен нулю. Однако приращение скорости, которое учитывает все положения вектора линейной скорости за время завершения полного оборота в равномерном вращательном движении, отлично от нуля и равно длине окружности радиуса (V). Одинаковым по величине и направлению вектором скорости в принципе может заканчиваться любое произвольное криволинейное движение. При этом абсолютная величина приращения скорости в любом интервале времени, если это приращение реально происходит, никогда не равна нулю.

Кривая, которая отражает совокупность всех положений стрелки вектора линейной скорости в процессе изменения его величины и направления является **годографом** вектора линейной скорости. Скалярная величина длины годографа и есть приращение величины скорости в общем случае любого движения. Конфигурация годографа в пространстве это геометрическая характеристика криволинейного движения, по которой можно судить об изменении направления этого движения во времени и в пространстве. Таким образом, полная информация об ускорении по изменению скорости во всем диапазоне её изменения в процессе любого вида движения определяется скалярной величиной длины годографа и геометрической конфигурацией годографа в пространстве.

Каждая точка годографа в общем случае определяет мгновенную величину и положение вектора линейной скорости в соответствующей точке траектории движения. Общая длина годографа, равная совокупности всех его точек, эквивалентна общему приращению величины линейной скорости или общему изменению величины линейной скорости в процессе изменения ее величины и направления за рассматриваемый период времени. При этом длина годографа есть величина скалярная, потому что совокупность множества направлений и величин не может быть вектором.

В классической модели вращательного движения вектор скорости из точки (A) переносится параллельно самому себе в точку (B) (Рис. 17 О. Ф. Кабардин «ФИЗИКА» МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991). Если таким же образом перенести в точку (B) все положения вектора скорости, которые он занимал в каждой точке дуги окружности между точками (A) и (B), то стрелка вектора скорости опишет дугу окружности радиусом (V), которая является геометрической траекторией изменения направления вектора скорости или годографом вектора скорости равномерного движения по окружности.

Существует прямая аналогия приращения вектора скорости прямолинейного движения и приращения вектора скорости криволинейного движения. И в прямолинейном движении, и в криволинейном движении приращением скорости является годограф. Прямолинейное движение это частный случай криволинейного движения. Приращение скорости движения и в том и в другом случае имеет одинаковый физический смысл. Для того чтобы аналогия между приращением скорости прямолинейного движения и приращением скорости криволинейного движения была более очевидной, рассмотрим привычный механизм определения приращения скорости прямолинейного движения с учётом понятия годографа скорости движения.

Применительно к прямолинейному движению точки (A) и (B) о которых идет речь у О. Ф. Кабардина (Рис. 17 «ФИЗИКА» МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991, см. выше) расположатся на одной прямой линии, являющейся траекторией прямолинейного движения. Перенесем в точку (B) все положения вектора скорости теперь уже прямолинейного движения, которые он занимал в каждой точке прямолинейной траектории между точками (A) и (B). Поскольку изменение направления прямолинейного движения равно нулю, то стрелки всех векторов также расположатся на одной линии в пределах классического разностного вектора (ΔV). Следовательно, годограф скорости прямолинейного движения совпадает с классическим разностным вектором, являющимся геометрической разностью начального и конечного векторов в рассматриваемом интервале времени.

Таким образом, ускорение прямолинейного движения определяется по сути дела через годограф вектора скорости прямолинейного движения, который в частном случае прямолинейного движения совпадает с линейным вектором (ΔV). Поэтому если уж и переносить аналогию определения приращения скорости прямолинейного движения на криволинейное движение, то необходимо воспользоваться не частным случаем, пригодным только для прямолинейного движения, а общим случаем определения приращения скорости любого движения, которое определяется через годограф скорости движения.

Криволинейное движение со скоростью, изменяющейся как по величине, так и по направлению, принципиально ничем не отличается в этом отношении от прямолинейного движения, скорость которого изменяется только по величине. Физический смысл приращения скорости и в том и в другом случае не изменяется. Приращение скорости в обоих случаях равно длине годографа вектора скорости. Разница состоит только в том, что в прямолинейном движении годограф прямолинеен и совпадает с отрезком траектории движения, пройденным за счет прироста скорости прямолинейного движения по абсолютной величине, т.е. с классическим разностным вектором (ΔV). Однако это только частный случай приращения движения. В общем случае криволинейного движения годограф криволинеен. Годограф криволинейного движения не совпадает и не должен совпадать ни пространственно, ни по абсолютной величине с приращением скорости криволинейного движения, определённым с помощью правил векторной геометрии. Классический прямолинейный разностный вектор не является приращением криволинейного движения.

Для криволинейного движения можно ввести **академическое** понятие криволинейного вектора приращения скорости, который пространственно совпадает с годографом. Длина такого вектора пропорциональна полному приращению скорости во всем диапазоне её изменения. Стрелка криволинейного вектора-годографа, совпадающая с направлением перемещения стрелки вектора скорости, указывает не направление ускорения криволинейного движения, а направление внешней силы, вызывающей изменение направления движения. Кривая линия вектора-годографа отражает геометрический характер изменения внешнего воздействия в пространстве в рассматриваемом интервале времени.

Длина годографа, отнесенная к интервалу времени определяет абсолютную величину ускорения криволинейного движения. А направление вдоль мгновенного радиуса годографа, т.е. вдоль вектора скорости определяет мгновенное направление результирующей силы и соответственно мгновенное направление физического ускорения и скорости криволинейного движения. Стрелка криволинейного вектора-годографа не является фиксированной и одинаково принадлежит каждой точке годографа. Перемещая стрелку криволинейного вектора-годографа в любую его точку и ориентируя её в соответствии с направлением касательной в этой точке, получим направление внешнего воздействия, получаемого телом в рассматриваемом физическом взаимодействии в любой момент времени.

С классической точки зрения вектор линейной скорости равномерного вращательного движения имеет постоянную величину. Радиус годографа скорости равномерного вращательного движения, который равен вектору линейной скорости в любой момент времени, также является постоянным, что на первый взгляд противоречит нашей модели вращательного движения. В нашей модели линейная скорость изменяется не только по направлению, но и по абсолютной величине, т.к. в направлении вектора линейной скорости действует мгновенное линейное ускорение вращательного движения. На первый взгляд это плохо согласуется с постоянным радиусом годографа скорости равномерного движения по окружности. Тем не менее, в этом нет никакого противоречия.

Как мы уже отмечали выше, абсолютная величина линейной скорости равномерного вращательного движения в каждом цикле преобразования движения по направлению претерпевает циклические изменения. Однако длительность законченного цикла изменения направления, по всей видимости, очень мала и зависит от механических свойств связующего тела и тела движущегося по окружности, а также от скорости и радиуса вращения. Изобразить графически все изменения линейной скорости в масштабе реального времени и реального значения средней величины линейной скорости не представляется возможным. Поэтому годограф скорости равномерного вращательного движения на макроуровне представляет собой окружность с постоянным радиусом, величина которого эквивалентна среднему значению величины линейной скорости равномерного вращательного движения.

На макроуровне ускорение вращательного движения, которое определяется средним ускорением законченного цикла преобразования движения по направлению **постоянно** по абсолютной величине**,** а само равномерное вращательное движение является, таким образом, равноускоренным движением. Нет никаких оснований, утверждать обратное, т.к. равномерное вращательное движение, по всей видимости, состоит из **одинаковых** циклов преобразования движения по направлению. В этом вопросе мы категорически не согласны с авторами статьи «Вращательное движение. Равномерное движение точки по окружности. Вектор угловой скорости. Угловое ускорение» ***(Mechanicshistori.ru*** *Классическая механика),* приведенной выше.

Авторы статьи утверждают, что равномерное движение по окружности не является равноускоренным: *«Пример плоского неравноускоренного движения, известный вам из школьного курса физики, — это* ***равномерное движение по окружности»***. Как же тогда расценивать тот факт, что ускорение **«неравноускоренного»** движения является величиной постоянной? По нашему мнению, равноускоренность это, прежде всего равномерность, т.е. постоянство изменения во времени изменяемого параметра физической величины, будь то абсолютная величина, направление или любой другой физический параметр, изменяющейся физической величины.

Налицо парадоксальная ситуация когда изменение направления движения, обеспечиваемое постоянным во времени ускорением направления считается не равноускоренным, только потому, что постоянная по величине линейная скорость равномерного вращательного движения изменяется по направлению. Однако с другой стороны изменение направления линейной скорости «**неравноускоренного**», но равномерного движения по окружности ассоциируется с **постоянным** по величине линейным центростремительным ускорением, что является отличительным признаком именно равноускоренного движения. Причем само изменение направления во времени так же является величиной постоянной, что опять-таки характерно именно для равноускоренного физического процесса.

Это противоречие легко разрешается, если учесть, что преобразование скорости по направлению эквивалентно её количественному преобразованию в новом направлении. С этой точки зрения равномерное движение по окружности ничем принципиально не отличается от прямолинейного равноускоренного движения, в котором равномерно во времени изменяется только абсолютная величина вектора скорости. В такой интерпретации и в том и в другом случае постоянной является именно количественная оценка изменения скорости движения. Следовательно, равномерное движение по окружности, в котором изменение направления скорости движения эквивалентно изменению (преобразованию) её абсолютной величины с полным основанием можно считать равноускоренным.

Для определения приращения функции от времени в этом случае достаточно простого арифметического деления приращения функции на аргумент, т.к. скорость приращения функции постоянна в любой момент времени. Обычно это не вызывает возражений, если равномерная функция линейная. Ведь не дифференцируем же мы приращение скорости прямолинейного равноускоренного движения для определения ускорения. В случае, когда функция нелинейная, но изменяется равномерно, как, например, направление линейной скорости при равномерном вращении, принципиально ничего не меняется, ведь **классическое** центростремительное ускорение, как условное ускорение вращательного движения равное среднему ускорению полного цикла преобразования скорости движения по направлению, является величиной постоянной.

Основываясь на этих соображениях, определим ускорение направления, не прибегая к дифференцированию приращения скорости за бесконечно малый интервал времени. Для простоты рассмотрим один полный оборот тела относительно центра вращения. Вектор линейной скорости при движении тела по окружности вращается относительно центра масс тела. Физически это означает, что движущееся по окружности тело вращается вокруг своей оси в направлении кругового движения. Тогда за полный оборот вектора скорости разностный вектор или длина годографа линейной скорости будет равна длине окружности радиуса (V):

$\Delta v = 2 * \pi * V$

Время, за которое тело и соответственно вектор линейной скорости совершат полный оборот равно:

$t = 2*\pi /\omega$

Тогда ускорение направления можно определить классически как частное от деления приращения направления на время этого приращения.

$a\text{н}= 2*\pi*V/(2 * \pi /\omega) = V*\omega$

или с учетом, что $\omega = V/R$:

$\boldsymbol{a}\mathbf{н} = \mathbf{V^2/R}$

Таким образом, можно получить выражение для ускорения направления совпадающее по форме с формулой для классического центростремительного ускорения простым делением приращения направления на полное время этого приращения, не прибегая к бесконечно малым интервалам времени, что ещё раз подтверждает, что равномерное движение по окружности является равноускоренным движением. Интервал времени для определения **ускорения направления** в отличие от определения классического центростремительного ускорения при равномерном **вращательном** движении может быть сколь угодно велик, если за приращение величины линейной скорости, принимается длина соответствующей дуги окружности с радиусом равным (V).

В рассмотренном случае два положения вектора линейной скорости отстоят друг от друга на целый оборот, что нисколько не повлияло на результат. Для определения ускорения направления равномерного вращательного движения **расстояние между рассматриваемыми положениями вектора линейной скорости, как и время изменения этого положения не имеют принципиального значения.** Если рассматриваемые положения вектора отстоят друг от друга на один или несколько оборотов, то длина «дуги» между ними или, другими словами, абсолютная величина изменения вектора скорости по направлению будет равна произведению длины окружности с радиусом, численно равным величине вектора (V) на количество оборотов (n):

$\Delta v = 2*\pi*V*n$

Величину центростремительного ускорения можно получить аналитически еще одним способом, не прибегая к дифференцированию, исходя из классических соотношений величин для вращательного движения:

На рисунке 1.1 показано изменение направления линейной скорости при круговом движении в направлении от точки (А) к точке (В).

Как известно угловая скорость вращения (ω) равна частному от деления линейной скорости (Va) на радиус (R):

$\omega = Va/R$ (1.1)

Линейная скорость ($a_н$) движения по окружности (ВС) с радиусом (V_a) равна:

$a\text{н} = \omega*Va$ (1.2)

Очевидно, что угловая скорость вращения радиуса (ОА) равна угловой скорости вращения вектора (Va). Тогда подставляя в формулу (1.2) выражение для угловой скорости (1.1) получим классическое выражение для центростремительного ускорения:

$a\text{н} = Va^2/R$ (1.3)

Никакого дифференцирования для определения величины центростремительного ускорения не потребовалось и в этом случае. Из приведенного выше вывода формулы центростремительного ускорения следует, что центростремительное ускорение это линейная скорость линейной скорости, т.е. ускорение, **изменяющееся по направлению** в соответствии с направлением линейной скорости и **направленное вдоль вектора линейной скорости** в любой момент времени.

Классический вывод формулы центростремительного ускорения (См. Рис. 17, О. Ф. Кабардин «ФИЗИКА» МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991 или Рис. 1.1), основан на анализе соотношения сторон подобных треугольников (АОВ) и (СВД). Стороны (АВ) и (СД) в этих треугольниках при очень малом интервале времени приращения вращательного движения мало отличаются от соответствующих им одноимённых дуг окружности, которые опираются на стороны (АВ) и (СД) как на хорды. Поэтому в классическом выводе формулы центростремительного ускорения стороны (АВ) и (СД) в пропорции (R/V*Δt≈V/ΔV (3.2)) фактически подменяются одноимёнными дугами.

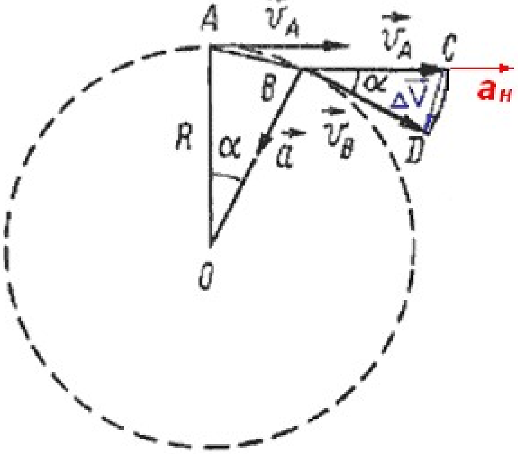


Рис. 1.1

В предложенном Кабардиным методе формула центростремительного ускорения фактически выводится не из подобия треугольников, а из подобия фигур (АОВ) и (СВД) стороны (АВ) и (СД), которых являются дугами окружности. Причём в равномерном вращательном движении фигуры (АОВ) и (СВД) подобны в любом интервале времени в пределах круга или полного оборота вектора линейной скорости. А с учетом цикличности равномерного вращения количество оборотов и интервал времени вообще не имеют никакого значения для определения приращения скорости движения. Это ещё раз подтверждает, что равномерное вращательное движение является равноускоренным движением.

Если рассматривать приращение равномерного вращательного движения именно как дугу, а не как хорду (СД) всё становится на свои места естественным образом. Знак примерного равенства в пропорции (R/V*Δt≈V/ΔV (3.2)) естественным образом заменяется знаком абсолютного равенства без ссылки на бесконечно малые приращения вращательного движения. Таким образом, для определения центростремительного ускорения, как постоянного ускорения равноускоренного по направлению движения, никакого дифференцирования приращения линейной скорости вращательного движения по времени не требуется. Для определения ускорения любого равноускоренного движения независимо от того, какое ускорение проявляется в этом движении: линейное или ускорение направления, достаточно простого арифметического деления приращения скорости движения на время.

Правильный результат в классическом выводе формулы центростремительного ускорения, несмотря на не верно выбранное приращение скорости вращательного движения, фактически достигается не за счёт минимизации и исключения погрешности приращения вращательного движения методом дифференцирования, а за счёт полной физической переоценки этого приращения, происходящей по ходу вывода. С учётом этой переоценки классический вывод формулы центростремительного ускорения по сути дела является альтернативным доказательством теоремы Жуковского о том, что скорость соответственной точки годографа равна полному ускорению точки, движущейся по траектории применительно к равномерному вращательному движению. Из этого следует, что приращение скорости равномерного вращательного движения равно годографу скорости (СД), но никак не линейному вектору (СД).

Самым необъяснимым и парадоксальным в классическом выводе формулы центростремительного ускорения с точки зрения физики и здравого смысла является первоначальный отказ от реального приращения скорости равномерного вращательного движения в угоду правилам векторной геометрии. Тем более что далее в ходе вывода происходит по сути дела естественный обратный переход от линейного разностного вектора (ΔV) к годографу линейной скорости вращательного движения. Создаётся впечатление, что классическую физику больше интересует, не установление физического смыла центростремительного ускорения, а полное утверждение в физике векторной геометрии применительно к любому виду движения.

Нет никакой объективной необходимости за приращение скорости равномерного вращательного движения принимать линейный разностный вектор (ΔV), что физически является заведомо неправильным в любом интервале времени, чтобы потом с помощью дифференцирования пытаться минимизировать искусственно допущенную методическую ошибку. Гораздо правильнее, на наш взгляд, эту ошибку не допускать. Тем более что понятие годографа, как приращения вектора скорости в общем случае криволинейного движения, давно известно в классической физике.

Годограф скорости применительно к прямолинейному движению оказывается равным классическому линейному разностному вектору (ΔV), что в конкретном частном случае прямолинейного движения нисколько не противоречит общим закономерностям определения приращения любого движения через годограф скорости. Общие закономерности всегда могут быть применены для любого частного случая. Однако обратная задача определения приращения скорости равномерного вращательного движения, как более общего случая движения через классический разностный вектор (ΔV) по аналогии с частным случаем прямолинейного движения не имеет физического смысла. Привычные стереотипы определения приращения скорости в частном случае прямолинейного движения применительно к общему случаю движения привели к многочисленным противоречиям классической модели вращательного движения.

Если абсолютная величина классического центростремительного ускорения в классической модели равномерного вращательного движения по приведённым выше причинам всё-таки соответствует реальной величине ускорения направления, то классическое направление разносного вектора (ΔV) на центр вращения, а, следовательно, и направление на центр классического центростремительного ускорения не выдерживает никакой критики. В учебнике физики для 9 класса (см. выше) представлено следующее обоснование направления центростремительного ускорения**.** "*Пользуясь правилом треугольника, совместим начала векторов и проведем красным цветом вектор разности (правый чертеж). Как видите, вектор разности скоростей, а, значит, и сонаправленный с ним вектор ускорения спутника направлен к центру окружности». ("Физика-9" Тема 13 «Введение в кинематику» **§ 13-л. «Центростремительное ускорение».)***

По чертежу, приведенному в учебнике физики для 9-го класса, невозможно строго утверждать, что разностный вектор направлен на центр вращения. Направление разностного вектора зависит от выбранного интервала времени изменения движения и изменения направления вектора линейной скорости. С уменьшением интервала времени разностный вектор действительно стремиться к направлению на центр вращения, но при условии, что вектор линейной скорости направлен по касательной к окружности, что физически, кстати, в классической модели вращательного движения ничем не обоснованно. Считается, что в свою очередь вектор линейной скорости неизменно направлен по касательной к окружности, т.к. перпендикулярно ему действует центростремительное ускорение, направленное к центру. То есть налицо нарушение причинно-следственных связей. Такое обоснование направления разностного вектора на центр вращения нельзя считать удовлетворительным.

Авторы статьи из раздела «Классическая механика» (***Mechanicshistori.ru*** *Классическая механика*) относительно направления вектора центростремительного ускорения говорят следующее: *«…вектор ускорения антипараллелен вектору* ***r****, то есть, направлен к центру»*. Довольно странный на наш взгляд вывод. Разве параллельность радиусу означает направление на центр? Из математики известно, что параллельные прямые не имеют точек пересечения. Прямая линия, параллельная или антипараллельная радиусу не может проходить через центр, если она не совпадает с самим радиусом. Как минимум сама терминология не имеет ни математического, ни физического смысла. Математика наука точная и требует соответственно точных и однозначных формулировок.

Кроме того, угол между центростремительным ускорением и радиус-вектором стремится к нулю только при стремлении к нулю интервала времени (Δt→0). Однако, при (Δt=0) само понятие ускорения, в том числе и направление ускорения, теряет физический смысл, т.к. любое ускорение имеет смысл только в интервале времени отличном от нуля. Значит, не имеет смысла и определение ускорения в условиях, в которых понятие ускорения не существует. Определение ускорения в интервале времени, стремящемся к нулю, оправдано только при неравноускоренном движении. Причём в этом случае речь идёт лишь об определении среднего ускорения в минимальном, но не равном нулю интервале времени, в котором происходит минимизация случайных погрешностей, связанных с непредсказуемым изменением физической величины, изменяющейся по произвольному закону. Среднее ускорение в минимальном интервале времени стремится к реальному ускорению неравноускоренного движения, но никогда не достигает его ни физически, ни по абсолютной величине.

В случае равномерного вращательного движения абсолютная величина среднего ускорения в минимальном интервале времени совпадает с истинным значением обобщённого академического ускорения направления. Это происходит потому, что классический разностный вектор в минимальном интервале времени реально ассоциируется с годографом скорости вращательного движения, а вовсе не потому, что интервал времени достиг какой-то требуемой минимальной величины, при которой не верно с физической точки зрения определённое ускорение гипотетическим образом превращается в истинное ускорение направления. Причём, по нашему мнению, роль дифференцирования классического разностного вектора вопреки воле авторов фактически заключается в том, чтобы логически обосновать переход от классического разностного вектора (ΔV) к реальному приращению равномерного вращательного движения, т.е. годографу скорости вращательного движения.

Таким образом, теоретическая (методическая) ошибка определения приращения равномерного вращательного движения по сути дела косвенно признаётся самой классической моделью вращательного движения и, хотя и не совсем корректно с физической точки зрения, компенсируется в практическом вычислении, в котором фактически осуществляется переход от линейного разностного вектора к годографу линейной скорости вращательного движения. Однако направление ускорения вращательного движения по-прежнему связывается с классическим разностным вектором, который является величиной абстрактной и не отражает реального движения с ускорением направления. Существуют две основные причины, по которым, на наш взгляд, ускорение вращательного движения в классической физике ассоциируют с линейным центростремительным ускорением, направленным на центр вращения.

Во-первых: во вращательном движении происходит отклонение траектории прямолинейного движения тела в сторону центра вращения. Однако отклонение в сторону центра вращения ещё не означает движения непосредственно на центр вращения. Физическое центростремительное ускорение действительно проявляется во вращательном движении. Однако центростремительное ускорение периодически сменяется таким же по величине центробежным ускорением (см. ниже). Таким образом, радиальное ускорение вращательного движения с одинаковыми основаниями можно считать как центростремительным, так и центробежным ускорением. В классической модели вращательного движения за направление ускорения принимается по сути дела одно из равноправных радиальных направлений, в котором проявляется реальное ускорение вращательного движения. Это является одним из противоречий классической модели вращательного движения.

Причиной изменения направления любого движения является активная внешняя сила, не совпадающая с направлением инерционного движения. За инерционное движение при движении по окружности в некотором приближении можно условно принять движение по касательной к окружности в достаточно малом интервале времени, в котором изменение направления и величины линейной скорости незначительны. Однако ускорение в направлении внешней силы по отношению к инерционному движению не является ускорением вращательного движения. Как мы уже говорили, вращательное движение осуществляется под действием результирующей силы, являющейся геометрической суммой внешней силы реакции и силы инерции, которая не направлена непосредственно на центр вращения. Результирующая сила вращательного движения лишь отклоняется от направления прямолинейного инерционного движения в сторону центра вращения за счёт первоочередного изменения направления активной внешней силы реакции.

Активная сила упругости увеличивается по мере накопления упругой деформации. Для накопления деформации, способной вызвать силу упругости достаточную для заметного изменения направления инерционного движения требуется некоторое время. При этом сила упругости в любой момент времени стремиться к направлению на центр вращения по той простой причине, что связующее тело физически связывает вращающееся тело с центром вращения. Направление же условно инерционного движения вдоль касательной к окружности в силу своей инерционности некоторое время остается относительно неизменным. Таким образом, вектор активной силы реакции связующего тела опережает по фазе вектор пассивной силы инерции, что приводит к отклонению результирующего движения в сторону центра вращения и определяет общее направление вращательного движения и новое направление инерционного движения в каждом цикле вращательного движения.

Отклонение тела к центру вращения или его неудаление от центра вращения, т.е. движение тела по линии окружности происходит не потому, что на тело действует линейное центростремительное ускорение или линейное центробежное ускорение, а потому что ускорение вращательного движения фактически направлено вдоль геометрической окружности, по которой и осуществляется реальное движение тела. Реальное мгновенное направление ускорения вращательного движения совпадает с мгновенным направлением вектора линейной скорости в каждый момент времени, что полностью отвечает представлениям современной физики о соответствии направления силы и вызванного ей ускорения.

В классической модели ускорение вращательного движения учитывается вдоль текущего радиального направления, связанного с движущимся по окружности телом, т.е. вдоль одного фиксированного направления внутри движущейся системы. Однако алгебраическая сумма радиальных ускорений в равномерном вращательном движении в среднем за цикл равна нулю. Радиальное движение внутри движущейся системы не учитывает поступательного движения самой системы в направлении линейной скорости под действием ускорения вращательного движения, что лишний раз подтверждает, что линейное радиальное ускорение не может являться ускорением вращательного движения. Ускорение вращательного движения, как линейное радиальное ускорение, направленное к центру вращения, физического смысла не имеет.

В некоторых случаях ускорение вращательного движения в классической физике, рассматривается как математическая оценка **скалярной** величины геометрического отклонения окружности от касательной, выраженное через ускорение по преодолению этого отклонения за минимальный интервал времени. Оценка отклонения окружности от касательной осуществляется через определение ускорения, которое потребовалось бы сообщить телу, движущемуся по касательной с постоянной линейной скоростью, для того чтобы преодолеть линейное отклонение точки на касательной от точки, движущейся все это время с реальным ускорением движения по реальной траектории. Другими словами классическое центростремительное ускорение численно равно ускорению по преодолению девиации вращательного движения.

Академически в некотором приближении образование девиации объясняется инерционным убеганием тела от центра вращения в отсутствии какого-либо ускорения, а преодоление девиации – это возвращение тела на реальную траекторию движения за счёт отложенного реального ускорения. Однако если преодоление девиации происходит за счет центростремительного ускорения, то образование девиации должно происходить за счет центробежного ускорения, т.е. определение ускорения вращательного движения через девиацию также не проясняет физической сущности центростремительного ускорения. Ускорение на отрезке девиации можно с одинаковым основанием считать как центростремительным, так и центробежным, т.к. геометрически ускорение проявляется в обоих направлениях.

Таким образом, направление **классического** центростремительного ускорения не зависимо от способа его определения является величиной условной, указывающей лишь на причину изменения направления за счет силы реакции, направленной в сторону центра вращения. Реальное мгновенное ускорение криволинейного движения не совпадает с академическим центростремительным ускорением и в любой момент времени направлено вдоль текущего вектора линейной скорости, т.е. вдоль усредненной линии геометрической окружности в масштабе вращательного движения в целом.

Во-вторых: ускорение направления ассоциируют с центростремительным ускорением в связи с перегрузкой, возникающей при движении тела по круговой траектории. Перегрузка обусловлена инерционным сопротивлением всякому изменению движения тела под действием каких-либо внешних сил, что связано, прежде всего, с инерцией массы тела и инерцией движения тела. Таким образом, перегрузка, действующая на тело, направлена в сторону противоположную воздействующей силе. Во вращательном движении перегрузка обусловлена инерционным сопротивлением преобразованию прямолинейного движения во вращательное, которое в среднем за цикл направлено во внешнюю сторону от центра вращения. При этом активная сила реакции направлена к центру вращения. В связи с этим возникает ассоциация, что ускорение вращательного движения направлено к центру вращения. Однако это поверхностный подход, не отвечающий физической сущности явления.

Перегрузка это противодействие двух противоположных сил, а значит и двух противоположных ускорений. Строго говоря, перегрузка вызывается не ускорением, а силой, поскольку именно сила может вызывать изменение движения. Ускорение это только следствие воздействия силы. При взаимодействии двух тел, каждое из которых воздействует на другое с одинаковой, но противоположной по направлению силой изменение движения не происходит. Следовательно, и ускорение каждого из тел в условиях равновесия воздействующих на них сил равно нулю. При этом каждое из взаимодействующих тел, тем не менее, будет испытывать перегрузку. Так, например, существует сила тяжести в отсутствии движения в сторону центра Земли, если тело находится или движется на горизонтальной опоре. Точно также существует и центробежная сила в отсутствии радиального движения в рамках полного цикла вращательного движения.

О направлении перегрузки имеет смысл говорить только по отношению к каждому из взаимодействующих тел в отдельности. Для каждого из взаимодействующих тел перегрузка направлена в сторону, противоположную внешнему воздействию, т.е. в направлении проявления силы инерции. Для движущегося по окружности тела перегрузка направлена в сторону центробежной силы и центробежного ускорения. Центральное тело, жестко связанное с центром вращения испытывает перегрузку в противоположном направлении. Однако суммарная перегрузка во вращающейся системе в целом равна нулю, т.к. алгебраическая сумма радиальных ускорений в среднем за цикл равна нулю. Следовательно, центробежная сила, действующая на тело и вызывающая перегрузку, в среднем за цикл не сообщает телу никакого радиального ускорения, т.е. перегрузка как таковая не может свидетельствовать о направлении ускорения того или иного тела только по факту своего существования без учёта движения тела.

В-третьих: чем меньше интервал времени (Δt) тем меньше отличается мгновенное направление центростремительного ускорения, как обобщённого ускорения вращательного движения от мгновенного направления линейного физического центростремительного ускорения, т.к. для установления результирующей силы требуется определенное время. Возможно, это и является одной из причин, по которой в классической физике за направление ускорения вращательного движения принимается направление внешнего воздействия со стороны силы упругости. Ведь в классической физике ускорение вращательного движения рассматривается именно за бесконечно малый интервал времени от воображаемого начала движения по окружности, в течение которого механизм реального движения по окружности не может быть осуществлён.

Таким образом, направленность классического центростремительного ускорения как ускорения вращательного движения непосредственно вдоль линии радиуса на центр вращения, в классической физике не обосновано и **физически не доказано.** В интервале времени близком нулю (Δt=0) классическое центростремительное ускорение превращается в виртуальную величину, направление которой характеризует только направление виртуальной внешней силы реакции ещё до установления результирующей силы. Как только внешняя сила реакции перестает быть виртуальной, направление ускорения вращательного движения, как результирующего ускорения тела, не может определяться направлением одной только внешней силы, которая является лишь одной из составляющих результирующей силы. Следовательно, реальное ускорение криволинейного движения, в том числе и ускорение равномерного вращательного движения никогда не будет направлено на центр вращения.

Направления всех физических величин в классической физике, в том числе и центростремительного ускорения, определены исключительно математическим путем как следствие достаточно условных, хотя может быть и логически правильных, но абстрактных математических приемов без малейшей связи с физикой явления. Как бы не был мал интервал времени (Δt) при определении физических величин, он не может быть меньше времени, требующегося для осуществления физических механизмов формирования некоторых физических величин и, тем более, не может быть равен нулю, т.к. при этом все логические математические построения теряют всякую связь с реальным физическим явлением. Величина классического разностного вектора с физической точки зрения никогда не равна приращению скорости по направлению даже при минимальном интервале времени дифференцирования, а его направление физически ничего общего не имеет с реальным направлением ускорения вращательного движения.

Все противоречия вращательного движения, на наш взгляд, связанны с чисто математическим, условным подходом к вопросам вращательного движения, когда вращающееся тело рассматривается как материальная точка, а траектория её движения усредняется до геометрической окружности, что приводит к многочисленным противоречиям классической модели вращательного движения.

Во-первых: за направление линейной скорости выбрано направление по касательной к окружности, что физически в классической физике никак не обосновано. По сути дела такое направление линейной скорости просто постулируется. Далее основываясь на этом постулате, делаются все остальные заключения. Например, при уменьшении интервала времени (Δt) уменьшается угол альфа, т.к. за небольшой отрезок времени направление вектора линейной скорости изменяется незначительно, следовательно, направление разностного вектора (Δv) приближается к направлению на центр вдоль радиуса вращения (см. О. Ф. Кабардин «ФИЗИКА» МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1991 Рис.17). Такой вывод с точки зрения логики нельзя считать обоснованным. Направление разностного вектора (Δv) будет приближаться, прежде всего, к направлению перпендикулярному **вектору линейной скорости.** И уже во вторую очередь, если условиться, что линейная скорость направлена по касательной к окружности, т.е. перпендикулярно радиусу, направление разностного вектора (Δv) будет приближаться к направлению на центр вращения.

Учитывая, что направление линейной скорости по касательной к окружности в классической модели вращательного движения по сути дела постулируется, направление центростремительного ускорения, как ускорения вращательного движения, основанное на этом факте, также можно считать постулатом, т.е. утверждением, принятым <u>без доказательства</u>.

Во-вторых: в классической модели вращательного движения разностный вектор, а вместе с ним и центростремительное ускорение могут быть направлены на центр вращения только при (Δt=0), когда какое-либо ускорение отсутствует в принципе. Таким образом, физическая сущность классического центростремительного ускорения виртуально определяется только при условиях, когда существование какого-либо ускорения невозможно в принципе, а в интервалах времени отличных от нуля ускорение направления равномерного вращательного движения определяется неоднозначно. И это притом, что центростремительное ускорение равномерного вращательного движения считается величиной постоянной и не должно зависеть от величины интервала времени, в котором оно определяется.

Пока сколь угодно малый интервал времени (Δt) отличен от нуля, т.е. при наличии реального движения реальное ускорение вращательного движения не может быть направлено на центр вращения, т.к. результирующая сила никогда не направлена на центр вращения.

При (Δt=0) можно определить только направления отдельных внешних сил приложенных к телу, которые также не определяют однозначно направление ускорения будущего движения, т.к. в каждый момент времени реального вращательного движения все эти силы проявляются по-разному и в разных направлениях. Однако в любом случае мгновенное направление равнодействующей всех сил и соответственно направление ускорения движения под действием этих сил в соответствии с законами физики в любой момент времени должно совпадать с направлением линейной скорости движения.

В-третьих: в классической модели вращательного движения центробежная сила уравновешивается силой упругости связующего тела. Однако одного только статического равновесия сил недостаточно для движения по окружности. При статическом равновесии сил в соответствии с первым законом Ньютона тело может двигаться только равномерно и прямолинейно или покоиться.

В условиях статического равновесия невозможно объяснить изменение направления линейной скорости в соответствии с изменением положения касательной в каждой точке окружности, т.е. невозможно объяснить движение по окружности.

В-четвертых: единственной силой, удерживающей вращающееся тело на одном и том же фиксированном расстоянии от центра вращения, является сила реакции связующего тела, уравновешивающая силу инерции прямолинейного движения тела. Сила реакции, направленная к центру вращения, может появиться только в результате деформации связующего тела при удалении вращающегося тела от центра вращения. А для того чтобы тело неограниченно не приближалось к центру вращения, сила реакции должна в определённый момент времени смениться противоположной по направлению силой инерции. Следовательно, линейная скорость, как минимум, не всегда должна быть направлена по касательной к окружности.

Для образования деформации, вызывающей изменение направления движения и для разрядки деформации после изменения направления на определенный угол вектор линейной скорости должен отклоняться от среднего равновесного положения вдоль касательной, как в ту, так и в другую сторону, в результате чего должна присутствовать радиальная составляющая движения. В отсутствии радиального движения, отсутствует и радиальная скорость, а значит, не может быть приращения радиальной скорости, т.е. центростремительного ускорения.

В классической модели вращательного движения, когда линейная скорость неизменно направлена по касательной к окружности, условия возникновения какого-либо радиального ускорения, в том числе и центростремительного ускорения отсутствуют.

В-пятых: периодическое изменение направления линейной скорости предполагает периодическое изменение величины и направления реального ускорения вращательного движения, которое по всем законам физики должно совпадать с реальным направлением скорости движения в каждый момент времени.

В классической модели вращательного движения центростремительное ускорение постоянно по величине и всегда направлено перпендикулярно линейной скорости, что противоречит законам физики для физического линейного ускорения.

В-шестых: современная модель вращательного движения не дает физического представления, каким образом обычное **линейное** центростремительное ускорение является ускорением по изменению **направления** линейной скорости.

В-седьмых: в соответствии с классической моделью во вращательном движении проявляется только центробежная сила и центростремительное ускорение. Центростремительная сила, равно как и центробежное ускорение в классической теории вращательного движения практически не упоминаются.

Либо в классической модели вращательного движения источником центростремительного ускорения является центробежная сила, что не соответствует действительности; либо классическая модель вращательного движения должна признать не только существование центробежной силы и центростремительного ускорения, но и центробежного ускорения и центростремительной силы, которые в настоящий момент не вписываются в классическую модель вращательного движения.

Эти противоречия не находят объяснения в классической модели вращательного движения. Классическая модель вращательного движения противоречива и условна и не объясняет ни направления линейной скорости, ни того факта, почему за направление вращательного движения принимается по сути дела направление внешнего воздействия на вращающееся тело со стороны связующего тела. При этом остается нераскрытым и сам механизм вращательного движения.

Несколько по-иному подходит к вопросам вращательного движения Жуковский Н. Е. «Теоретическая механика» издание второе. ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ МОСКВА-ЛЕНИНГРАД 1952 г. При определении полного ускорения криволинейного движения Жуковский Н. Е. пользуется понятием годографа. Он доказывает теорему о том, что скорость соответственной точки годографа линейной скорости есть не что иное, как полное ускорение материальной точки, движущейся по криволинейной траектории (см. фотокопии ниже стр. 41).

Мы не совсем согласны с некоторыми деталями приведенного доказательства теоремы. Логические построения безупречны с точки зрения математики, но на наш взгляд не достаточно аргументированы с физической точки зрения. Равенство проекций на одни и те же оси само по себе вовсе не означает равенства проецируемых векторов. Для этого проецируемые вектора должны быть, как минимум одинаково ориентированы в пространстве по отношению к соответствующим осям координат, доказательства чего в теореме отсутствуют. И вообще, на наш взгляд, доказательства этой теоремы не требуется. Все и так достаточно очевидно и вытекает из определения годографа, о чем мы говорили выше. Ведь никто не пытается доказывать теорему о том, что скорость соответственной точки годографа в прямолинейном движении геометрически равна ускорению прямолинейного движения!

В прямолинейном движении это достаточно очевидно. В криволинейном движении это не столь очевидно, но суть приращения скорости криволинейного и прямолинейного движения одна и та же. Тем не менее, мы не оспариваем справедливость самого смысла теоремы, как пути определения ускорения. Это полностью совпадает с нашим представлением об ускорении вращательного движения, как о линейной скорости соответственной точки годографа. Если скорость соответственной точки годографа есть не что иное, как полное ускорение материальной точки, движущейся по криволинейной траектории, то совокупность всех точек годографа есть не что иное, как приращение скорости криволинейного движения за счет полного ускорения в течение времени (Δt).

Жуковский рассматривает общий случай криволинейного неравномерного движения, поэтому дифференцирование для определения полного ускорения оправдано, т.к. ускорение в таком случае является величиной переменной. При равномерном же вращательном движении дифференцирование лишь обнажает перечисленные нами выше противоречия. Эти противоречия не разрешены и у Жуковского. Хотя математическое выражение для центростремительного ускорения получено Жуковским на основании понятия годографа линейной скорости, тем не менее, центростремительное ускорение, как ускорение вращательного движения по Жуковскому определяется как проекция на нормаль полного ускорения криволинейного движения.

В случае неравномерного криволинейного движения противоречия понятия центростремительного ускорения несколько менее заметны, чем при равномерном вращательном движении. Действительно, в общем случае криволинейного движения под действием внешней силы линейная скорость может быть переменной не только по направлению, как в равномерном вращательном движении, но и по величине. При этом наличие линейного центростремительного ускорения, как проекции на нормаль полного ускорения, не вызывает возражений. действительно скорость движения вдоль нормали и расстояние до геометрического центра кривизны в неравномерном, в том числе и по абсолютной величине скорости криволинейном движении не может не изменяться.

При равномерном вращательном движении по Жуковскому полное ускорение движения трансформируется в центростремительное ускорение. Математически все получается достаточно просто (см. ниже стр. 45 первоисточника формула (41)). При равномерном вращательном движении с классической точки зрения величина линейной скорости постоянная, следовательно, прирост скорости (dV) в формуле (41) равен нулю. Тогда полное ускорение равно центростремительному ускорению, а сила P превращается в центростремительную силу, которая уравновешена силой инерции Q. Но в таких условиях как мы показали выше центростремительное ускорение должно быть равно нулю. Кроме того, нормальная составляющая ускорения по изменению направления является только составной частью ускорения вращательного движения.

Таким образом, хотя Жуковский определяет ускорение криволинейного движения через годограф скорости, физическая сущность ускорения направления остаётся не раскрытой. В конечном итоге ускорение равномерного вращательного движения по Жуковскому сводится к классическому варианту центростремительного ускорения со всеми его неразрешенными противоречиями.

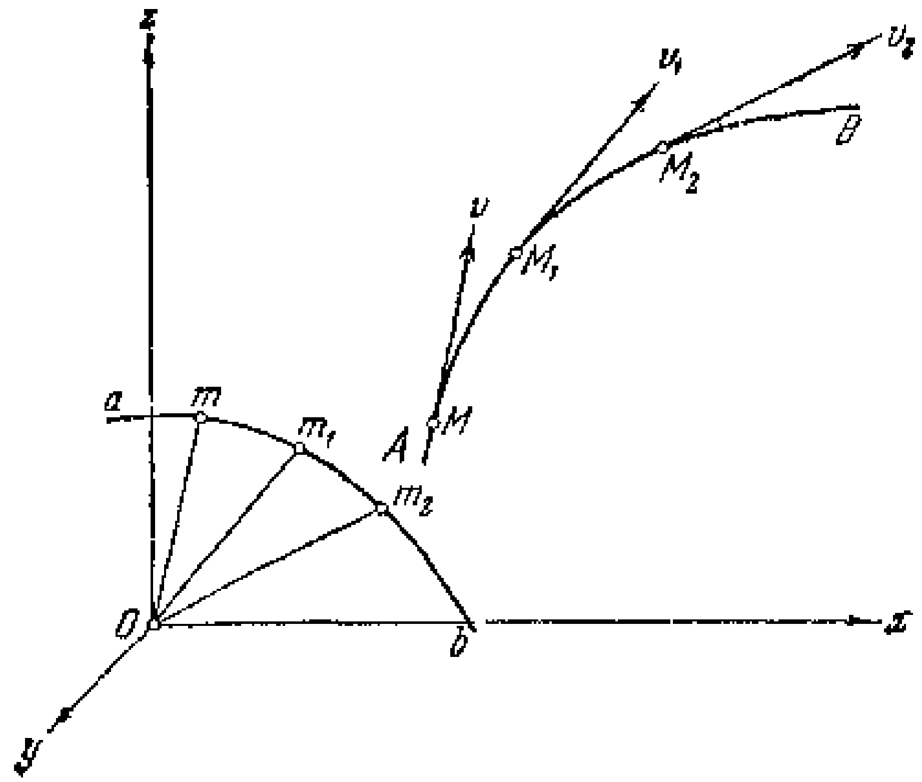
Классическая схема действия сил при равномерном вращательном движении не раскрывает механизма возникновения и направления центростремительного ускорения. Да и полное ускорение неравномерного криволинейного движения нуждается в обосновании. Жуковский не приводит объяснение, каким образом гипотетическая сила (P) обеспечивает движение по криволинейной траектории (AB). Ведь для этого не достаточно простого равновесия силы (P) и силы инерции (Q) или их проекций на нормаль (см. ниже оригинал стр. 280, 281). Необходим механизм постоянного изменения направления силы (P).

У Жуковского сила (P) - академическая. По-видимому, он имел в виду силу или воздействие, которое в данном случае неважно по каким причинам заставляет тело двигаться по заданному закону. Жуковского, скорее всего, больше интересовала математическая сторона вывода формулы полного и центростремительного ускорения в данных условиях, а не физическое обоснование механизма вращательного движения.

Мы не согласны и с определением Жуковским центробежной силы как силы фиктивной. Являясь, безусловно, «компонентом предполагаемой силы инерции», центробежная сила не более фиктивная, чем гипотетическая сила (P). Ведь не только сила инерции, но и любая другая сила, в том числе и сила (P), проявляется только во взаимодействии тел. И если есть сила (P), то есть соответственно и сила инерции (Q) или центробежная сила, которая проявляется во взаимодействии с силой реакции связующего тела.

§ 9. Годограф скорости. Для доказательства теорем, относящихся к полному ускорению, удобно пользоваться особой кривой, называемой годографом скорости. Познакомимся с нею.

Пусть по траектории AB (фиг. 21) движется некоторая точка M. Пусть скорость ее последовательно меняется по величине и направлению и принимает положения v, v_1, v_2, ... Проведем из начала



Фиг. 21.

координат O векторы Om, Om_1, Om_2, ..., геометрически равные v, v_1, v_2, ... Соединив концы этих векторов, получим ломаную линию, которая обратится в кривую, если точки M, M_1, M_2, ... взять достаточно близко. Эта кривая ab и представляет годограф скорости. Итак, *годограф скорости* есть кривая, проходящая через концы векторов, проведенных из начала, равных и параллельных скоростям движущейся точки.

Точка m на годографе, находящаяся на конце вектора v, представляющего скорость движущейся точки в положении M, называется точкой, *соответственной* точке M. Всякому положению точки на траектории соответствует точка на годографе. Нетрудно найти уравнение годографа. В самом деле, пусть x', y', z' суть координаты точки m годографа, соответствующей точке M траектории. Эти координаты суть не что иное, как проекции скорости v на оси координат; если уравнения движения точки на траектории суть

$$x=\varphi(t), \quad y=\psi(t), \quad z=\chi(t),$$

то проекции скорости v, а следовательно, и координаты x', y', z' выразятся так:

$$x'=\varphi'(t)=\frac{dx}{dt}=v\cos\alpha,$$

$$y'=\psi'(t)=\frac{dy}{dt}=v\cos\beta,$$

$$z'=\chi'(t)=\frac{dz}{dt}=v\cos\gamma,$$

где α, β и γ суть углы v с осями координат. Исключая из трех уравнений t, получим уравнение годографа скорости.

Теорема. *Скорость соответственной точки годографа геометрически равна полному ускорению точки, движущейся по траектории.*

Пусть уравнения движения точки M (фиг. 22) суть

$$x=\varphi(t), \quad y=\psi(t), \quad z=\chi(t).$$

Тогда координаты соответственной точки m годографа суть

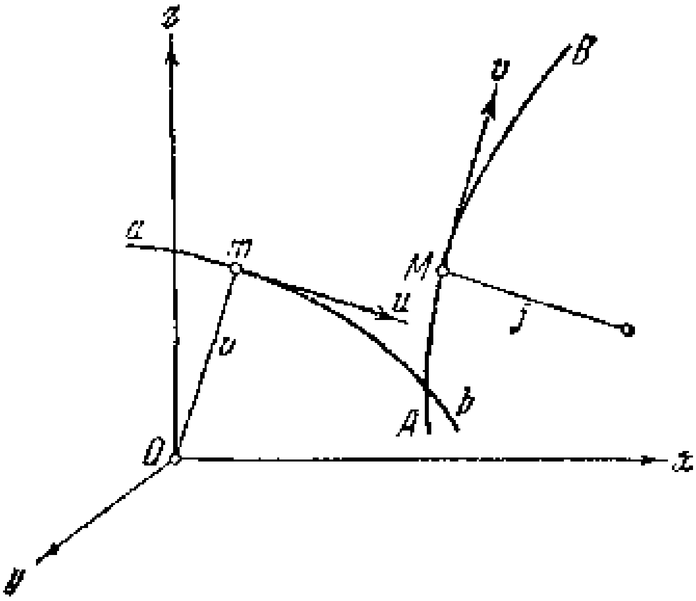
$$x'=\varphi'(t), \quad y'=\psi'(t), \quad z'=\chi'(t).$$

Обозначив через u скорость точки m, проектируем ее на оси координат:

$$\text{пр}_x u=\frac{dx'}{dt}=\frac{d^2x}{dt^2},$$

$$\text{пр}_y u=\frac{dy'}{dt}=\frac{d^2y}{dt^2},$$

$$\text{пр}_z u=\frac{dz'}{dt}=\frac{d^2z}{dt^2}.$$



Фиг. 22.

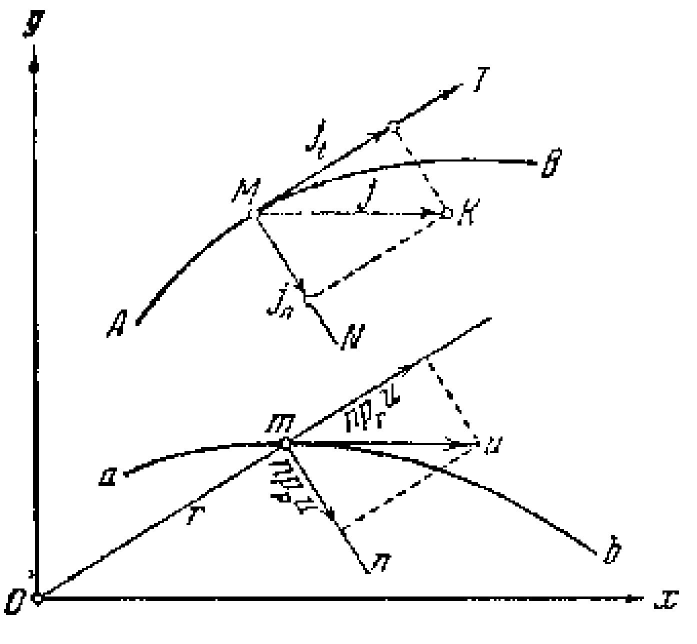
Но проекции полного ускорения j точки M на оси координат суть также $\frac{d^2x}{dt^2}$, $\frac{d^2y}{dt^2}$ и $\frac{d^2z}{dt^2}$. А так как проекции на одни и те же оси равны, то и проектируемые векторы равны; следовательно:

$$u=j, \tag{38}$$

т. е. u, скорость точки m годографа, есть ускорение точки M.

§ 10. Проекции ускорения на касательную и главную нормаль к траектории. Теорема. *Проекция полного ускорения на касательную к траектории равна производной от величины скорости по времени, т. е.* $\frac{dv}{dt}$, *а проекция полного ускорения на главную нормаль к траектории равна квадрату скорости, деленному на радиус кривизны траектории данной точки, т. е.* $\frac{v^2}{\rho}$.

A) Доказательство теоремы для плоской траектории. Пусть точка движется в плоскости Oxy по траектории AB (фиг. 25). Годограф скорости для данного движения пусть есть ab. Было уже показано, что j, полное ускорение в точке M на траектории, геометрически равно u, скорости соответственной точки m на годографе, т. е. $\bar{j} = \bar{u}$.



Фиг. 25.

Проектируем полное ускорение на касательную и нормаль к траектории в точке M. Пусть эти проекции соответственно будут j_t и j_n. Проектируем также скорость u на продолжение радиуса-вектора Om, параллельного MT, и на перпендикуляр mn к нему в точке m, параллельный MN. В силу геометрического равенства $\bar{j} = \bar{u}$ имеем:

$$j_t = \text{пр}_r\, u,$$

т. е. проекция полного ускорения на касательную равна проекции скорости u на радиус-вектор. Но

$$\text{пр}_r\, u = \frac{dr}{dt} = \frac{dv}{dt};$$

отсюда

$$j_t = \frac{dv}{dt}; \qquad (39)$$

j_t называется *тангенциальным* ускорением, так как направлено по касательной.

Перейдем к определению j_n. Из построения ясно, что

$$j_n = \text{пр}_\rho\, u.$$

Но

$$\text{пр}_\rho\, u = r\frac{d\varphi}{dt} = v\frac{d\varphi}{dt},$$

откуда

$$j_n = v\frac{d\varphi}{dt}.$$

Угол $d\varphi$ между направлениями двух смежных скоростей, или, что все равно, между касательными к кривой в двух смежных точках называется *углом смежности*. Из анализа известно, что отношение угла смежности $d\varphi$ к бесконечно малой дуге ds, соответствующей этому углу, есть мера кривизны кривой в данной точке, которая измеряется также и величиной $\frac{1}{\rho}$, где ρ — радиус кривизны кривой в данной точке; следовательно:

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{1}{\rho}.$$

Представим теперь j_n в таком виде:

$$j_n = v\frac{d\varphi}{ds}\frac{ds}{dt}.$$

Но $\frac{d\varphi}{ds} = \frac{1}{\rho}$, а $\frac{ds}{dt}$ есть не что иное, как v; следовательно:

$$j_n = \frac{v^2}{\rho}. \tag{40}$$

j_n называется *центростремительным* ускорением, так как направлено всегда в сторону вогнутости кривой по направлению к центру кривизны.

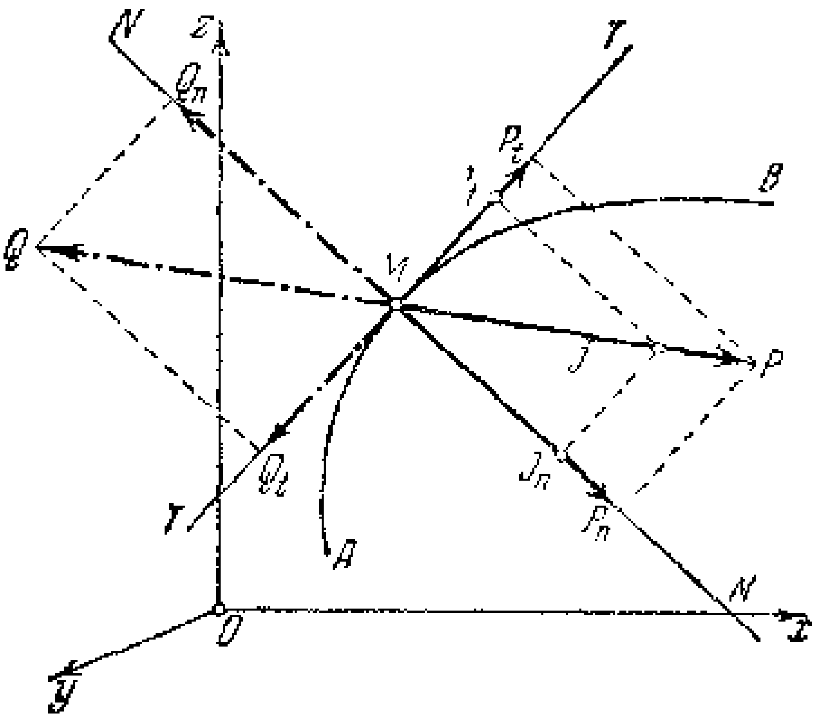
Из прямоугольного треугольника MNK имеем:

$$j = \sqrt{j_t^2 + j_n^2}.$$

Подставив сюда выведенные значения j_t и j_n, получим:

$$j = \sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \left(\frac{v^2}{\rho}\right)^2}. \tag{41}$$

§ 3. Центростремительная и центробежная силы. Пусть на материальную точку M (фиг. 231) массы m действует сила P, сообщая ей ускорение j. Разложим это ускорение на два: на тангенциальное $j_t = \frac{dv}{dt}$, направленное по касательной T, и на центростремительное $j_n = \frac{v^2}{\rho}$, направленное по нормали N к центру кривизны. Отложим на нормали N от точки M вектор $\bar{M}P_n = mj_n$, а на касательной T от той же точки вектор $MP_t = mj_t$.



Фиг. 231.

Построив прямоугольник на этих векторах, мы увидим, что диагональ его есть $MP = mj$, откуда заключаем, что эти векторы суть два компонента силы по касательной и по нормали; из них вектор

$$P_t = mj_t = m\frac{dv}{dt} \tag{3}$$

называется *тангенциальной* силой, а вектор

$$P_n = mj_n = m\frac{v^2}{\rho} \tag{4}$$

называется нормальной или *центростремительной* силой.

Если теперь разложим силу инерции Q на два компонента — по нормали и по касательной, то получим:

$$Q_t = -mj_t = -m\frac{dv}{dt}, \tag{5}$$

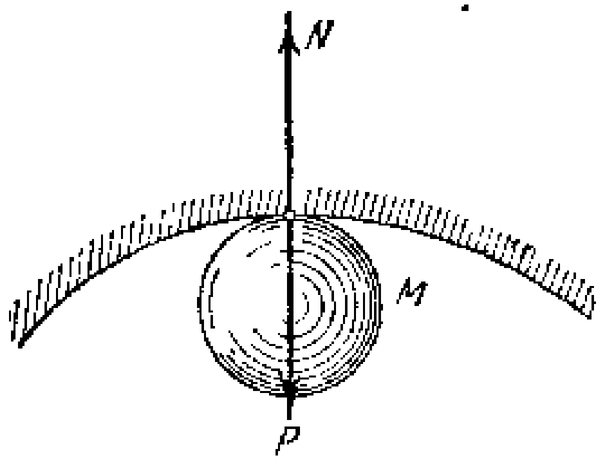
направленную по касательной обратно P_t и называемую *тангенциальной силой инерции*, и

$$Q_n = -mj_n = -m\frac{v^2}{\rho}, \tag{6}$$

§ 4] РАЗМЕР МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ ИЗМЕРЕНИЯ 281

направленную по нормали, от центра кривизны, и называемую *центробежной силой инерции*.

Являясь компонентом предполагаемой силы инерции, центробежная сила есть сила фиктивная; она должна быть присоединена к материальной точке, если мы хотим рассматривать вопрос о ее движении, как об относительном равновесии точки. Но в некоторых вопросах центробежная сила является и как некоторая действительная сила, — например, в вопросах об определении давления движущегося тела на препятствия, стесняющие его движение. Но в этом случае центробежная сила приложена не к материальной точке, а к тем телам, которые задерживают материальную точку на ее траектории. Если, например, некоторый шар M (фиг. 232) движется по цилиндрическому своду, описывая круг, то на него действует сила P давления свода, которая для шара есть центростремительная. Но по третьему закону динамики шар M сам давит на свод с такой же силой N, равной P. Эта сила N для шара будет центробежной силой инерции, и можно сказать, что свод находится под действием этой силы.



Фиг. 232.

Во вращательном движении не мало неразрешенных вопросов. Что такое и как образуется центробежная сила? Что такое и как образуется центростремительное ускорение в отсутствии движения к центру? Как происходит поворот вектора линейной скорости? И некоторые другие... Математика безупречная наука при операциях с числами, но физические величины это не числа, и их свойства не зависят от математических приемов. Мы согласны, что в современной физике без математики не обойтись, но физические величины должны быть, прежде всего, обоснованы физически и только после этого описаны математически. Иначе это будет не физика, а «занимательная математика».

Математическая физика, в которой суть физических явлений определяется лишь по результатам строго логических, но абстрактных математических преобразований, несколько отличается от собственно физики. Теории, построенные на основе математической физики далеки от реальной физики, и все больше подвергаются критике современных ученых. Пример такой теории – знаменитая теория относительности ОТО и СТО Эйнштейна, а также квантовая механика. По нашему мнению полученные в таких теориях правильные математические соотношения это беда современной физики, потому что они создают иллюзию правильности тупиковых с точки зрения физики теорий.

Мы не хотим подвергать ревизии математическую составляющую теории вращательного движения. Все физические величины и соотношения теории вращения, выраженные в формулах, количественно верны, кроме ускорения Кориолиса, по нашему мнению, о чем пойдёт речь ниже. Мы хотели бы в меру своих возможностей уточнить физический смысл явления, в том числе: направления вектора линейной скорости и направления реального ускорения вращательного движения. Это может внести ясность в решение многих прикладных задач, связанных с вращением.

В современной модели вращательного движения классическое понятие центростремительного ускорения не обосновано физически и не раскрывает механизм вращательного движения. По-видимому, противоречивость основных понятий вращательного движения в академической науке вызвано тем, **что**

движение материальных тел рассматривается как движение материальной точки в отрыве от реальных физических процессов, протекающих в реальных телах при их взаимодействии. Наша точка зрения на **примерный механизм** преобразования прямолинейного движения во вращательное, который является элементом любого криволинейного движения, а так же на механизм возникновения центробежной силы пояснена ниже (см. Рис. 1.2, 1.3, 1.4).

Для образования вращательного движения тело должно иметь инерцию прямолинейного движения. Необходимо разогнать покоящееся тело (В) до какой-то скорости прямолинейного движения (Vп), которая в дальнейшем в процессе преобразования прямолинейного движения во вращательное движение приобретет значение линейной скорости вращения (Vл). Движущееся прямолинейно тело соединим связующим телом с центром вращения. Пусть центр вращения зафиксирован в пространстве, чтобы не смешивать при рассмотрении вращательного движения непосредственно вращение и прямолинейное движение. В противном случае тело получит оба вида движения.

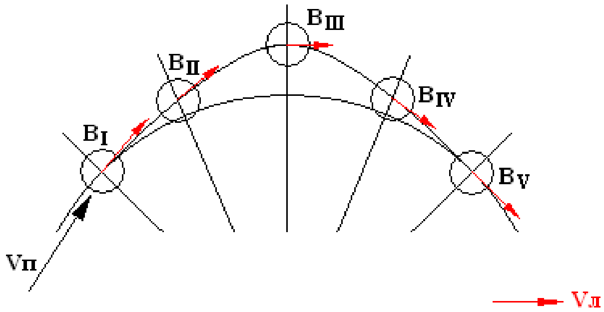


Рис. 1.2

На Рис. 1.2 условно изображены пять фаз процесса изменения направления движения тела (В) во вращательном движении: начало цикла преобразования, середина цикла преобразования, окончание цикла преобразования и по одной фазе в каждом полуцикле преобразования движения. Фазы обозначены римскими цифрами (I,II,III,IV,V). В первой фазе происходит «захват» движущегося прямолинейно тела (В) со скоростью прямолинейного движения (Vп) связующим телом. В этот момент инерция движения максимальна, а сила реакции минимальна. В фазах с первой по третью расстояния (А) и (С) увеличиваются (см. Рис. 1.2, 1.3), т.к. тело удаляется от центра будущего вращения.

Поскольку тело имеет некоторую протяженность в направлении линейной скорости, то расстояния (А) и (С) от центра вращения до крайних точек тела расположенных на линии движения всегда разные. Причем расстояние (С) всегда больше расстояния (А). Следовательно, передняя по ходу движения часть области сопряжения растягивается сильнее, чем задняя, что соответствует изгибу. Таким образом, в связующем теле постепенно накапливается упругая деформация двух видов. Это растянутая деформация, образующаяся за счет общего удлинения связующего тела и изгибная деформация, образующаяся за счет разницы расстояний (А) и (С).

Растянутая деформация распределяется равномерно по всей длине связующего тела. Изгибная деформация накапливается в основном непосредственно в области сопряжения тела со связующим телом, т.е. сосредотачивается преимущественно в некотором ограниченном объеме. Границы деформации условно обозначены на рисунке 1.3. В левой части области деформации (синий цвет) накапливается «малое» растяжение, в то время как, в правой части (голубой цвет) – большее растяжение.

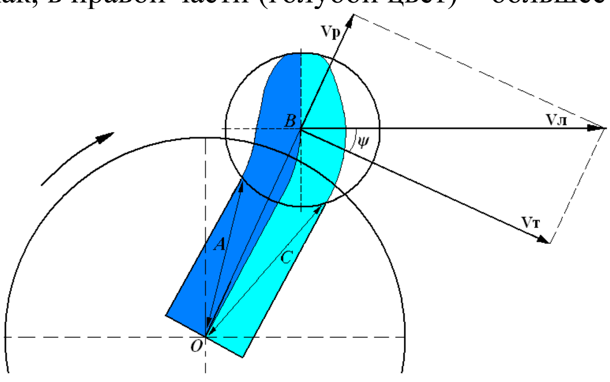


Рис. 1.3

Движение в радиальном направлении происходит в условиях нарастающего противодействия силы упругости. Для того чтобы в этих условиях продолжалось радиальное движение, должен осуществляться опережающий прирост силы инерции в радиальном направлении, что обеспечивает не просто инерционное движении в радиальном направлении в сторону от центра вращения, а ускоренное радиальное движение. Опережающий прирост силы инерции в радиальном направлении может осуществляться только за счет непрерывного увеличения проекции скорости движения на радиальное направление, несмотря на уменьшение линейной скорости по величине, что обеспечивается ростом угла (ψ) в процессе образования изгибной деформации.

Таким образом, на этапе накопления деформации в фазах с первой по третью проявляется центробежное ускорение. Однако по мере роста силы упругости скорость нарастания деформации снижается. Кроме того, удаление тела от центра вращения и увеличение угла (ψ) приводит к уменьшению скорости прироста разницы расстояний (А) и (С), что кроме упругого противодействия движению тела в направлении линейной скорости способствует дополнительному снижению изгибающего момента и приросту изгибной деформации. В третьей фазе заканчивается процесс накопления деформации. Угол (ψ) и радиальная составляющая линейной скорости перестают увеличиваться. Сила реакции достигает своего максимального значения, а сила инерции минимальна.

На фоне ослабевания изгибающего момента резко возрастает разгибающий момент, который запускает общую разрядку деформации. Начинается обратный процесс – линейная скорость увеличивается под действием силы упругости, а угол (ψ) уменьшается, что приводит к проявлению центростремительного ускорения. В пятой фазе сила инерции вновь приобретает максимальное значение, в то время как сила реакции вновь становиться минимальной. После этого весь процесс полностью повторяется.

Центробежная и центростремительная силы, вызывающие соответствующие ускорения, это не самостоятельные силы. Это всего лишь радиальные составляющие результирующей или суммарной линейной силы (F∑л), являющейся геометрической суммой силы инерции и силы реакции в период накопления и в период разрядки деформации соответственно. На Рис. 1.4 схематично показано образование центробежной силы (F∑р) и центростремительной силы реакции (F∑рр) в момент их статического равновесия при максимальном удалении вращающегося тела от центра вращения.

За счет силы реакции связующего тела происходит торможение тела, как в радиальном направлении (F∑рр), так и в тангенциальном направлении (F∑рт). При этом общее сопротивление движению тела оказывает суммарная сила реакции линейная (F∑рл). Через определенный промежуток времени суммарная сила реакции (F∑рл) должна полностью скомпенсировать результирующую силу (F∑л), проявляющуюся в направлении вектора линейной скорости (Vл). Однако за счет увеличивающегося изгиба на этапе накопления деформации происходит опережающий прирост силы инерции и, следовательно, результирующей силы (F∑л), определяющей движение тела в каждый момент времени.

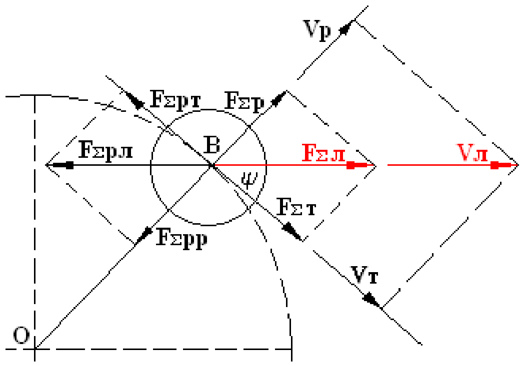


Рис. 1.4

Как мы уже отмечали, механизм работы сил упругости при вращении аналогичен механизму отражения движущегося прямолинейно тела от отражающей поверхности с учетом особенностей вращательного движения. При взаимодействии с отражающей поверхностью сила упругости противодействует, прежде всего, перпендикулярной к плоскости отражающей поверхности составляющей скорости движения тела. Когда перпендикулярная скорость полностью скомпенсирована силой упругости отражающей поверхности, происходит «короткое скольжение тела вдоль поверхности», которое провоцирует высвобождение энергии деформации. Сила упругости сообщает телу перпендикулярную скорость в обратном направлении, которая складывается с оставшейся неизменной продольной скоростью. При этом результирующая скорость возрастает до первоначальной величины, но уже в новом направлении. Наконец, после полной разрядки деформации тело отделяется от поверхности и продолжает движение в новом направлении с прежней по величине скоростью.

Это, конечно же, упрощённое, схематичное представление физического механизма отражения. Фактически никакого продольного скольжения без трения при взаимодействии тела с отражающей поверхностью быть не может. Скорее всего, при взаимодействии тела с отражающей поверхностью образуются определённые зоны деформации, в том числе и изгибной, которые за счёт силы упругости сообщают телу ускорение и движение в направлениях, соответствующих описанной выше схеме. Подробно останавливаться на этом здесь нет необходимости. Уяснив механизм вращательного движения, можно прояснить в деталях и механизм отражения.

Во вращательном движении роль перпендикулярной составляющей скорости движения к поверхности отражения играет радиальная составляющая скорости тела (Vр). Но в отличие от однократного «отражения», где перпендикулярная составляющая скорости тела постоянна и обусловлена первоначальным взаимным угловым расположением вектора скорости и отражающей поверхности, радиальная составляющая скорости тела в каждый момент времени разная и по величине и по угловому положению относительно вектора линейной скорости.

В период накопления деформации с увеличением угла (ψ) радиальная составляющая скорости движения тела увеличивается, т.к. увеличивается проекция скорости движения тела на геометрический радиус вращения, причём каждый раз в новом направлении текущей результирующей линейной скорости движения. Происходит, как мы уже отмечали, опережающий рост инерции движения тела в радиальном направлении. Поэтому полная компенсация радиальной составляющей во вращательном движении невозможна, до тех пор, пока не скомпенсирована вся кинетическая энергия движения тела. В отличие от обычного отражения, в котором перпендикулярная составляющая скорости движения в течение всего процесса отражения не получает дополнительной подпитки за счет общей кинетической энергии тела и является величиной постоянной, т.к. угол падения и угол отражения не изменяются.

За счёт изгибной деформации происходит поэтапная компенсация радиальной составляющей скорости движения в каждом текущем направлении, которое изменяется в соответствии с изгибом оси связующего тела. В каждом новом направлении линейной скорости результирующего движения радиальная составляющая движения увеличивается, за счёт изменения углового положения вектора линейной скорости по отношению к радиусу. Чем больше угол (ψ) и меньше угол между вектором линейной скорости и радиусом, тем больше радиальная составляющая движения. Поэтому полная компенсация радиальной составляющей возможна только после прекращения подпитки радиального движения за счет общей кинетической энергии движения тела при изменении угла изгиба связующего тела.

Это может случиться только в двух случаях. Либо при прекращении увеличении угла (ψ), либо при полной компенсации инерции движения тела за счёт силы упругости растянутой и изгибной деформации, т.е. при полной остановке движения. Если угол между геометрическим радиусом и скоростью движения тела будет постоянно увеличиваться, то скорость движения тела может быть полностью скомпенсирована силой упругости растянутой и изгибной деформации, т.к. все большая часть скорости движения тела будет скомпенсирована в виде текущей радиальной составляющей. Это сделает невозможным вращательное движение. Однако во вращательном движении полной компенсации инерции движения тела не происходит, т.к. изгибная деформация оказывается остановленной значительно раньше этого момента.

С увеличением изгиба одновременно возрастает центробежная сила (F∑р), создающая вращающий момент, плечом которого является перпендикуляр, восстановленный из центра масс тела на радиальную линию, связывающую геометрический центр вращения и центр изгиба. С увеличением изгиба плечо действия центробежной силы также увеличивается, а, следовательно, возрастает и вращающий момент центробежной силы. Вращающий момент центробежной силы (F∑р) направлен противоположно изгибающему моменту. Таким образом, увеличивающаяся с ростом угла (ψ) инерция радиального движения начинает препятствовать росту изгибной деформации. К тому же с увеличением угла (ψ) снижается рост изгибающего момента, т.к. уменьшается прирост разности расстояний (А) и (С).

В конце концов, возрастающий разгибающий момент силы упругости сначала сравнивается по величине с уменьшающимся изгибающим моментом силы инерции, а затем превышает его, что приводит к разрядке изгибной деформации. Разрядка изгибной деформации начинается в середине III фазы и является своего рода «спусковым крючком» для общей разрядки деформации. При разрядке деформации с уменьшением угла (ψ) начинается движение тела центру вращения. В V фазе в конце цикла разрядки деформации угол (ψ) вновь становится равным нулю, как и в начале цикла накопления деформации в фазе I.

Накопление упругой деформации происходит на разных направлениях в соответствии с изгибом связующего тела. Соответственно и высвобождение силы упругости накопленной деформации, спровоцированное разгибающим моментом, происходит последовательно во всех направлениях, которые занимали вектор результирующий или суммарной линейной силы (F∑л) и вектор скорости движения тела (Vл) в период формирования деформации. Таким образом, структура накопленной деформации обеспечивает эффект «веера отражений», т.е. каждое «отражение» осуществляется в новом направлении, все более приближающемся к касательной. При этом линейная скорость тела увеличивается за счет силы упругости связующего тела. Инерция движения становится максимальной, а сила реакции минимальной. С возрастанием инерции движения в направлении близком к касательной тело вновь начинает удаляться от центра вращения. Далее весь процесс преобразования движения по направлению повторяется.

Образование установившегося вращательного движения во многом определяется жесткостью связующего тела. Если жесткость связующего тела будет недостаточной, то при радиальном удалении тела от центра вращения будет преобладать растянутая деформация связующего тела. В этом случае поворот движения в сторону центра вращения происходит только после того как значительная часть инерции первоначального прямолинейного движения оказывается скомпенсированной виде радиальной составляющей движения за счёт силы упругости растянутой деформации. Большая часть инерции движения тела перейдёт в потенциальную энергию растянутой деформации. При этом в точке поворота инерция движения и соответственно линейная скорость уменьшатся до величины, недостаточной для удержания тела за счет центробежной силы на круговой траектории с радиусом вращения равным достигнутому удалению тела от центра вращения.

Под действием силы упругости растянутой деформации, вобравшей в себя большую часть кинетической энергии движения тела начнется движение к центру вращения по криволинейной траектории резко отличающейся от круговой. Причём если в точке поворота инерция движения тела будет полностью скомпенсирована, траектория движения будет близка к прямой, проходящей непосредственно через центр вращения. Вместо движения по окружности получится беспорядочное колебательное движение относительно центра вращения по произвольной траектории до полного затухания колебаний. Если же связующее тело имеет достаточную начальную жесткость, разрядка изгибной деформации и соответственно поворот скорости движения тела в сторону центра произойдёт при достаточно большом значении инерции движения. При этом центробежная сила, проявляющаяся в процессе реализации механизма вращательного движения, обеспечит удержание тела на усреднённой круговой траектории с достигнутым средним радиусом вращения, уравновешивая силу реакции.

Благодаря своевременному изменению направления под действием изгибной деформации, к моменту достижения вектором линейной скорости (Vл) положения касательной, тело приобретает инерцию движения, достаточную для преодоления текущей силы упругости растянутой деформации связующего тела. По этой причине растянутая деформация во вращательном движении разряжается не полностью. Часть кинетической энергии движения тела с первоначальной скоростью (Vп) переходит в потенциальную энергию **остаточной деформации**, которая и определяет жесткость связующего тела, необходимую для преобразования прямолинейного движения со скоростью (Vп) во вращательное движение на достигнутом радиусе вращения с линейной скоростью (Vл). При этом значение линейной скорости установившегося вращательного движения (Vл) в фазе (V) будет несколько меньше первоначальной скорости тела (Vп).

Как мы уже отмечали выше, процесс накопления деформации сопровождается продвижением тела в текущем направлении линейной скорости. При этом линейная скорость всегда имеет проекцию на касательную к некоторой усредненной круговой траектории. При разрядке деформации, тело также движется в направлении линейной скорости, которая также имеет проекцию на касательную к усредненной окружности. **Таким образом, общее направление движения тела будет осуществляться по усредненной круговой траектории.** Усредненная траектория вращательного движения заключена между двумя окружностями с минимальным и максимальным радиусами вращения, которые определяются максимальным и минимальным удлинением связующего тела в установившемся вращательном движении (см. рис. 1.5). При этом реальная траектория движения тела, конечно же, будет отличаться от идеальной окружности.

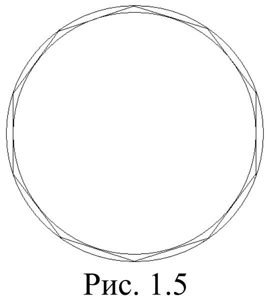


Рис. 1.5

В отношении механизма образования вращательного движения наша точка зрения в некоторой мере пересекается с точкой зрения, представленной в «Элементарном учебнике физики» под редакцией академика Г. С. Ландсберга на странице 227, параграфа 117 «Возникновение силы, действующей на тело, движущееся по окружности» (М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004). Мы приводим фотокопию страницы 227 из этой работы.

В целом мы согласны с описанием начального этапа растягивания резиновой нити, но с некоторыми оговорками. **Установившегося, т.е. статического равновесия при вращательном движении по нашему мнению быть не может**, поскольку в результате изменения направления движения проявляются дестабилизирующие динамически изменяющиеся силы инерции и силы упругости под действием, которых это равновесие периодически нарушается. Поэтому статическое положение равновесия во вращательном движении может длиться лишь короткое мгновение.

В первый момент после начала движения сила со стороны нити на грузик не действует — резина не растянута. Поэтому он начнет двигаться прямолинейно и расстояние между ним и точкой O будет увеличиваться (расстояние OA больше, чем расстояние OA_0), резина начнет растягиваться, в результате чего появится сила, действующая

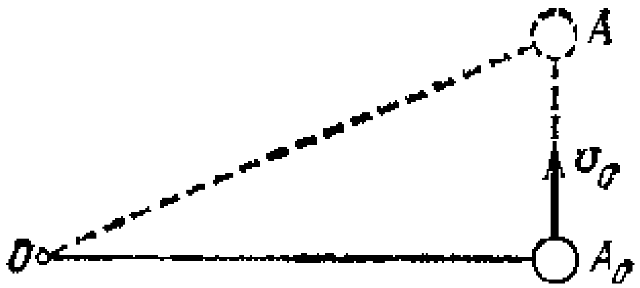


Рис. 184. В первый момент после толчка грузик движется по прямой A_0A и его расстояние от точки O увеличивается

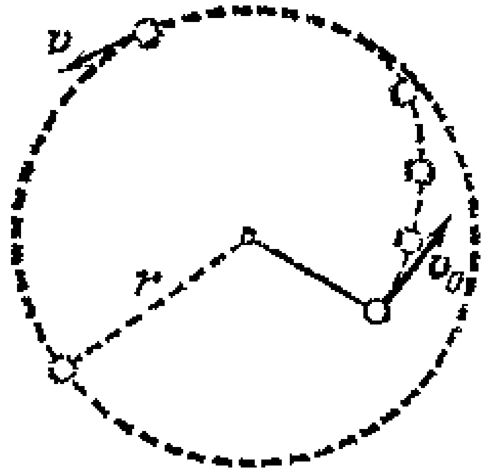


Рис. 185. Движение грузика после начального толчка

на грузик со стороны нити, он получит ускорение, направленное к точке O, и его траектория начнет искривляться.

Однако пока нить мало растянута, это искривление траектории будет недостаточным для того, чтобы грузик двигался по окружности, и он будет продолжать удаляться от точки O, увеличивая растяжение нити, а значит, и силу, действующую на грузик (рис. 185). В результате кривизна траектории будет продолжать увеличиваться, пока траектория не превратится в окружность. Тогда нить перестанет растягиваться. Следовательно, установится как раз такое растяжение нити, при котором она будет действовать на грузик с силой упругости, сообщающей ему ускорение, необходимое для равномерного движения по окружности, радиус которой равен длине растянувшейся нити. Эта сила, как мы знаем (см. формулу (116.1)), должна быть равна mv^2/r, где m — масса грузика, v — его скорость и r — радиус траектории. Если нить жесткая или если вместо нити взять стержень, то практически растяжение, создающее требуемую силу, будет очень мало и в качестве r можно взять длину нерастянутой нити или исходную длину стержня, а за установившуюся скорость принять начальную скорость v_0.

Необходимо учитывать, что сила инерции проявляется мгновенно с той величиной, которая необходима для того, чтобы скомпенсировать внешнее воздействие, т.е. силу реакции нити, до тех пор, пока не израсходован запас кинетической энергии движения тела. Напротив, сила реакции возрастает постепенно по мере накопления упругой деформации. По этой причине максимальные и минимальные значения силы упругости и силы инерции никогда не совпадают по фазе. В каждой точке установившегося вращательного движения после смены направления движения под действием силы инерции и силы реакции грузик у Ландсберга или тело (В) в нашей редакции по-прежнему будут стремиться либо улететь от центра вращения, либо вновь приблизиться к центру вращения в зависимости от фазы реализации механизма вращательного движения.

За периодом накопления деформации, в котором происходит уменьшение инерции движения и поворот тела к центру вращения, наступает период разрядки деформации и увеличение инерции в новом направлении движения. Увеличивающаяся инерция движения остановит процесс разрядки деформации и вновь приведет к повторению всего процесса в целом в новой точке усреднённой окружности. Точно так же как и в первом цикле, частично описанном в работе Ландсберга, или как изложено в нашей модели вращательного движения в каждой новой исходной точке окружности, соответствующей началу нового цикла расстояние до точки (О) по-прежнему будет стремиться к увеличению, пока накопившаяся деформация через силу упругости не остановит это увеличение.

Первоначальное удлинение резиновой нити, происходящее в результате недостаточной жесткости нерастянутой нити довольно значительно. По мере удлинения нити упругая жесткость возрастает, поэтому последующие деформации уже не столь заметны и поэтому не столь очевидны особенно, если вместо нити - жесткий стержень. Инерция предполагает сохранение движения в неизменном виде. Остановить движение или **изменить его направление может только внешняя для тела сила, препятствующая силе инерции движения.** В данном случае изменить направление движения тела может только выросшая в результате дополнительной деформации сила упругости нити или связующего тела, что, по всей видимости, и происходит.

После периода первоначального удлинения резиновой нити в условиях возросшей жесткости нити сила реакции способна изменить направление движения грузика. При этом разрядка деформации начинается при достаточно высокой скорости инерционного движения тела, что создает условия для образования вращательного движения, в котором величина и направление силы инерции и линейной скорости плавно изменяются по гармоническому закону. Не полностью растянутая нить не имеет достаточной жесткости изгибной деформации необходимой для образования разгибающего момента способного прекратить процесс накопления деформации еще до полной компенсации линейной скорости и образования вращательного движения. Поэтому растягивание будет происходить до тех пор, пока жесткость нити не возрастет. Если нить будет недостаточно жесткая, значительная часть скорости движения тела будет погашена силой упругости растянутой и изгибной деформации. При этом если линейная скорость на момент наступления разрядки изгибной деформации будет не достаточно высокой, то движения по окружности вообще не получится. Вместо вращения наступит беспорядочное движение тела относительно центра закрепления нити по траектории, значительно отличающейся от окружности.

Ландсберг утверждает, что в какой-то момент времени нить перестанет растягиваться, потому что установиться такое растяжение нити, при котором сила упругости сообщит телу ускорение, равное центростремительному ускорению равномерного вращения по окружности с радиусом, равным длине растянувшейся нити (см. первоисточник выше). При этом имеется в виду, что установится постоянный неизменный радиус вращения. То есть опять мы сталкиваемся с утверждением классиков, что центростремительное ускорение может быть в отсутствии радиального движения. Однако ускорения без движения в сторону действия силы быть не может. Двигаясь вдоль радиуса только в одну сторону, тело будет постоянно напрягать нить, в крайнем случае, до полной остановки движения. **Без обратного движения под действием силы упругости не будет и центростремительного ускорения.**

Кроме того, воздействия одного только центростремительного ускорения не достаточно для движения по окружности. Под действием постоянного центростремительного ускорения общая результирующая скорость не может оставаться постоянной и будет непрерывно возрастать, а траектория такого движения будет представлять собой спираль. Причём ускорение такого движения будет направлено вдоль результирующей силы с учётом инерции движения тела с достигнутой в каждый момент времени текущей линейной скоростью. При этом внешнее ускорение, перпендикулярное текущей линейной скорости движения будет только одной из составляющих общего ускорения, проявляющегося при движении тела по спирали. Для осуществления равномерного движения по окружности необходим саморегулирующийся физический механизм, при котором все физические компоненты движения претерпевают циклически повторяющиеся симметричные изменения.

Картина вращательного движения будет неполной, если мы не выясним, как будет вести себя остальные тела в составе вещества плоского круга и далее в составе объемного тела, например, для простоты – цилиндрического в ходе вращательного движения. Рассмотрим движение двух одинаковых тел, расположенных диаметрально на одинаковых расстояниях от центра вращения в одной плоскости и связанных с центром одинаковыми связующими телами. Это будет модель вращения тел в составе вещества круга, расположенных на окружности одного радиуса. Далее распространим это движение на все тела, лежащие в пределах всех концентрических окружностей плоского круга, а затем и по всему телу цилиндра.

Для простоты опять же предположим, что центр вращения жестко зафиксирован в пространстве. Тогда движение тела расположенного диаметрально телу (В) ничем не будет отличаться от движения самого тела (В). Причем движение обоих диаметрально расположенных тел будет синхронизироваться общим связующим телом. Эти рассуждения относятся к установившемуся вращательному движению или к начальному этапу вращательного движения, если на каждое тело воздействует одинаковая сила инерции, но в противоположных по отношению друг к другу направлениях. Если силы инерции неодинаковые или прямолинейную скорость получает только одно из тел, начало вращения будет несколько отличаться от описанной схемы.

В этом случае второе тело получит начальный импульс движения от связующего тела. При этом начальная область деформации второго тела будет развиваться в сторону противоположную от оси связующего тела, чем деформация первого тела. Но после выравнивания скоростей второго тела со своим связующим телом процесс пойдет по описанной схеме. При этом сила инерции одного из тел поровну распределится между обоими телами, и каждое из них будет иметь только половину первоначальной инерции движения первого тела.

Что касается остальных тел, лежащих на одной окружности в составе плоского круга, то нет никаких оснований полагать, что их поведение при вращательном движении будет отличаться от поведения рассмотренных тел. То же самое можно сказать и в отношении остальных тел, лежащих на других окружностях круга и объемного тела в целом. Таким образом, механизм движения фрагмента объемного тела можно распространить на все тело в целом. Движение всех фрагментов будет синхронизироваться друг с другом через общее тело. Амплитуда колебаний при неизменной угловой скорости будет, по-видимому, возрастать по мере удаления от центра вращения.

Из рассмотренного механизма вытекает, что вращательное движение это разновидность колебательного движения, причем колебания всех величин происходят на более высоком уровне деления материи. Но на любом даже самом высоком из известных уровней деления материи элементы вещества имеют, конечно же, вполне определенные, а не бесконечно малые размеры. Поэтому колебания всех величин будут вполне реальными, а не математической абстракцией, каковой является классическое центростремительное ускорение. Причем на этом уровне все величины, по-видимому, линейные, а изменения их значений и направлений происходят под действием постоянно изменяющихся сил взаимодействующих между собой элементов вещества.

Поскольку в макромире, наблюдается средний уровень параметров вращательного движения, то все физические величины, характеризующие вращательное движение на макроуровне будут выглядеть, как постоянные с учетом их усредненного значения по аналогии с переменными электромагнитными величинами. Все усредненные значения параметров вращательного движения совпадают с их классическими значениями, кроме ускорения направления (центростремительного ускорения), направление которого, по нашему мнению, совпадает с усреднённым направлением линейной скорости вращательного движения вдоль касательной к усреднённой окружности.

Поскольку вращательное движение является разновидностью колебательного движения, то все параметры вращательного движения, о которых мы говорили, как о постоянных величинах, будут иметь свои постоянные значения условно в смысле постоянства их действующих или средних значений. Представление вращательного движения в виде колебательного процесса позволяет разрешить перечисленные выше противоречия классической модели вращательного движения. Представленная модель вращательного движения свободна, от каких бы то не было постулатов. Направления линейной скорости и центростремительного ускорения (ускорения направления) объяснены естественным образом на базе классической физики, и не противоречивы.

При этом отмеченное выше противоречие классической модели о невозможности движения по окружности при неизменном направлении линейной скорости по касательной, вследствие отсутствия условий для возникновения центростремительного ускорения, также разрешается естественным образом. Центростремительное ускорение отсутствует только короткое время, пока линейная скорость направлена по касательной к окружности. При гармонических колебаниях максимальная и минимальная амплитуда изменяющейся физической величины наблюдается в момент, когда скорость изменения этой величины равна нулю. Следовательно, в момент, когда направление линейной скорости приближается к касательной - величина линейной скорости максимальна, а центростремительное и центробежное ускорения равны нулю. Соответственно в момент, когда угол (ψ) максимален величина линейной скорости минимальна. При этом центростремительное и центробежное ускорения также равны нулю.

Таким образом, разрешается одно из противоречий классической модели вращательного движения, в соответствии с которой вращательное движение осуществляется в условиях статического равновесия центробежной и центростремительной силы. Статическое равновесие центробежной и центростремительной силы не обеспечивает криволинейного движения. Во вращательном движении центробежная сила инерции и центростремительная сила реакции находятся в **динамическом равновесии.**

Вращательное движение является саморегулирующимся динамическим процессом, в котором средние значения величины линейной скорости (Vл), величины радиуса вращения (R_0) и величины ускорения направления (*ан*) устанавливаются и поддерживаются автоматически в рамках автоколебательного физического процесса.

При равномерном прямолинейном движении сопротивление движению связано только с сопротивлением внешней среды. В отсутствии сил трения и сопротивления внешней среды равномерное прямолинейное движение может продолжаться сколь угодно долго. Тело, движущееся по окружности, испытывает сопротивление движению даже при отсутствии сопротивления внешней среды. Однако сопротивление вращательному движению в отсутствии сил трения носит реактивный характер подобно реактивному сопротивлению электрического колебательного контура. Поэтому безвозвратных потерь энергии во вращательном движении, связанных с преобразованием прямолинейного движения во вращательное движение не происходит. В процессе изменения направления прямолинейного движения кинетическая энергия прямолинейного движения не тратится, а претерпевает преобразование из кинетической энергии в потенциальную энергию и обратно. Тем не менее, даже при отсутствии трения в опорах вращающейся системы, вращение должно постепенно замедляться, т.к. при накоплении и разрядке упругой деформации энергия во вращательном движении все-таки расходуется на внутреннее трение.

Потери на внутреннее трение можно сравнить с потерями на активное сопротивление в электрическом колебательном контуре. При этом вращающееся тело, соединенное с центром вращения жестким упругим связующим телом подобно колебательному контуру с высокой добротностью. А вращение со связующим телом с мягкой упругостью имеет низкую добротность. Вращение с мягкой упругостью без подпитки энергией быстро прекращается, в то время как вращение с жестким связующим телом сохраняется значительно дольше, т.к. потери энергии в высокодобротной системе значительно меньше, чем в низкодобротной системе.

Величина кинетической энергии вращательного движения тела меньше кинетической энергии прямолинейного движения тела до его «захвата» связующим телом, т.е. до начала процесса преобразования прямолинейного движения во вращательное движение. Часть энергии прямолинейного движения переходит в потенциальную энергию остаточной деформации. Если происходит постепенный разгон тела, движущегося по окружности, то энергия установившегося движения тела по окружности также будет меньше энергии, затраченной на разгон тела, т.к. часть энергии разгона перейдет в потенциальную энергию остаточной деформации. **Поэтому линейная скорость установившегося движения тела по окружности (Vл) всегда меньше скорости прямолинейного движения тела (Vп) при одинаковой энергии, вызывающей каждое из этих движений.**

Если рассматривать усредненные параметры вращательного движения, то равномерно движущееся по круговой траектории тело испытывает воздействие постоянной по величине и направлению центробежной силы в отсутствии движения в направлении воздействующей силы, т.к. центробежная сила в среднем за цикл уравновешивается силой реакции. Таким образом, среднее ускорение вращательного движения в радиальном направлении равно нулю. Аналогичное воздействие испытывают физические тела, движущиеся равномерно и прямолинейно по горизонтальной опоре в поле силы тяготения, При этом сила тяготения уравновешивается силой реакции опоры. Ускорение в направлении силы тяготения в этом случае отсутствует, поскольку нет перемещения в направлении действия силы тяготения. По всей видимости, сила тяготения и центробежная сила имеют одну и ту же природу и являются проявлением силы инерции.

Причём статического воздействия по нашему мнению в природе не существует. Любое воздействие может осуществляться только за счет движения, например, при передаче импульса движения частиц эфира каждому мельчайшему элементу физических тел. Статическое воздействие – это равновесие динамических процессов, происходящих на более высоком уровне деления материи. В статике тела испытывают динамическое воздействие, уравновешенное аналогичным динамическим воздействием с противоположным знаком со стороны опоры. Причем, несмотря на то, что любое взаимодействие связано с движением микрочастиц материи, для каждого из взаимодействующих тел оценкой взаимодействия является, прежде всего, сила, т.к. в момент взаимодействия движение, а, следовательно, и ускорение могут отсутствовать.

Поскольку вращательное движение происходит с постоянной линейной скоростью, среднее ускорение в направлении линейной скорости также как и среднее ускорение в радиальном направлении равно нулю. В связи с этим утверждение некоторых ученых о том, что равномерное вращательное движение является одним из видов равномерного движения, не кажутся такими уж беспочвенными. На микроуровне вращательное движение, безусловно, является неравномерным движением. Но если рассматривать вращательное движение на макроуровне, когда все средние величины параметров вращения постоянны в «макровремени», то вращательное движение можно рассматривать как равномерное движение. В связи с этим первый закон Ньютона применительно к вращательному движению можно сформулировать следующим образом:

Движение тела по окружности является инерционным движением или движением по инерции, если равнодействующая всех сил в *динамическом* процессе изменения направления линейной скорости равна нулю, а среднее значение инерции движения тела (кинетическая энергия кругового движения), соответствующее круговому движению с заданными параметрами остается постоянным. Такое движение соответствует равномерному движению по окружности.

Центростремительное ускорение на макроуровне в отсутствии суммарного радиального движения такая же иллюзия, как и ускорение силы тяготения на макроуровне в отсутствии движения в направлении силы тяготения при равномерном прямолинейном движении тела по горизонтальной поверхности. Иллюзия центростремительного ускорения возникает в результате пространственного геометрического «неудаления» тела от центра вращения. При этом не следует забывать, что вращающееся тело не только не удаляется от центра окружности, но и не приближается к нему. Однако почему-то никто не называет ускорение направления центробежным ускорением, хотя основания для этого точно такие же, как и для того, чтобы считать ускорение направления центростремительным ускорением. Реальные центробежное и центростремительное ускорения в среднем за цикл уравновешивают друг друга.

Для определения мгновенного значения ускорения тела при движении по криволинейной траектории на микроуровне необходимо учитывать изменение линейной скорости во всем диапазоне ее изменения. При этом определение мгновенного значения ускорения не только неравномерного криволинейного движения в общем случае, но и равномерного вращательного движения задача достаточно сложная. К тому же определение мгновенного значения ускорения, проявляющегося в процессе преобразования прямолинейного движения во вращательное движение, не всегда оправдано, т.к. вращательное движение, как физическое явление в полной мере характеризуется обобщенным академическим ускорением вращательного движения. Поэтому при рассмотрении дальнейших вопросов, связанных с вращательным движением будем пока условно считать ускорением вращательного движения классическое центростремительное ускорение. Лишь в принципиальных моментах, там, где это непосредственно касается физического смысла явления, будем называть вещи своими именами.

2. ВРАЩЕНИЕ ТЕЛ В НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ.

Фундаментальные законы природы, если они верны, должны выполняться в любых условиях. Поэтому законы вращательного движения должны выполняться и на Земле и в космосе. Однако в небесной механике необходимо учитывать специфику движения тел в поле тяготения. Космические объекты, как правило, тела протяженные. Их в еще большей степени, чем обычные тела нельзя рассматривать как материальные точки. Заменяя реальные физические тела материальными точками можно выявить лишь наиболее общие закономерности, не раскрыв физической сущности явления.

На Рис. 2.1 графически пояснен механизм движения тела по круговой орбите в небесной механике в нашем видении. На нижнюю и верхнюю часть небесного тела действует сила тяготения (Fтн) и (Fтв) соответственно. Очевидно, что нижняя часть тела испытывает большую силу тяготения, чем верхняя за счет разницы расстояний до центра тяготения. Проекции этих сил (Fн) и (Fв) на направление линейной скорости уменьшают инерционную скорость (Vи), причем нижние точки тела будут замедляться сильнее верхних точек. Это эквивалентно появлению момента сил, который приводит к повороту движения тела в сторону центра тяготения и уменьшению угла (ψ) между вектором линейной скорости и касательной к окружности с текущим радиусом.

В результате общего замедления движения под действием силы тяготения и вследствие этого уменьшения радиальной составляющей линейной скорости, радиальное удаление тела от центра тяготения прекращается, после чего начинается движение тела в сторону центра вращения. При этом под действием ускорения тяготения линейная скорость тела начнет увеличиваться. При приближении к центру тяготения на расстояние, соответствующее исходному расстоянию до центра тяготения величина линейной скорости восстанавливается до исходного значения, а направление движения совпадает с направлением касательной к круговой орбите с радиусом равным исходному расстоянию до центра тяготения. Далее весь процесс повторяется с новой точки исходной орбиты.

Таким образом, прослеживается полная аналогия механизма движения тел в поле тяготения с механизмом движения по окружности обычных тел, связанных с центром вращения связующим телом с той лишь разницей, что сила упругости связующего тела заменяется в небесной механике силой тяготения. Причём поскольку при движении тел в поле тяготения связующее тело отсутствует, то отсутствует и остаточная деформация. Поэтому линейная скорость тела при возвращении его на исходную орбиту должна быть равна исходной скорости прямолинейного движения тела (Vп=Vи=Vл).

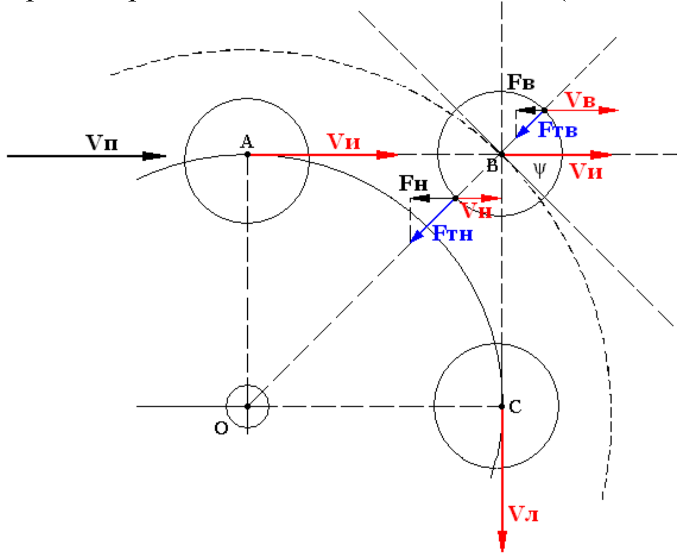


Рис. 2.1

Как было показано выше форма траектории движения обычных тел, связанных с центром вращения связующим телом зависит от добротности вращающейся системы. Наиболее стабильным является движение по круговой траектории, которое соответствует наибольшей добротности вращающейся системы. В небесной механике форма орбиты также зависит от добротности вращающейся системы. Однако в отсутствии связующего тела добротность вращающейся системы в небесной механике определяется не жесткостью связующего тела, как во вращающейся системе при круговом движении тела, механически связанного с центром вращения, а начальной линейной скоростью движения по орбите для каждого фиксированного расстояния до центра вращения. Чем больше начальная линейная скорость движения небесного тела соответствует линейной скорости движения по круговой орбите на данном расстоянии до центра тяготения, тем выше добротность вращающейся системы в небесной механике.

Для Земли скорость движения по круговой орбите в непосредственной близости от её поверхности соответствует первой космической скорости и равна 7,9 км/с. Движение по орбите со скоростью, отличающейся от расчётной скорости движения по круговой орбите, имеет более низкую добротность. При начальной скорости движения у поверхности Земли больше первой космической (но не более 11,2 км/с для Земли) тело будет двигаться по эллиптической траектории. Наконец при некоторой исходной скорости тело может полностью преодолеть силу тяготения. Это вторая космическая скорость, которая у поверхности Земли составляет 11,2 км/с.

Расчётная скорость круговой орбиты определяется массами взаимодействующих небесных тел и квадратом расстояния между ними. Из закона всемирного тяготения следует, что ускорение свободного падения не зависит от массы падающего тела. Однако, на наш взгляд, это выполняется только для несопоставимых по величине масс, когда (M>>m). Для соизмеримых масс (M=m) ускорение взаимного сближения тел под действием силы тяготения должно зависеть от массы каждого из взаимодействующих тел. Это может выражаться, например, в зависимости гравитационной постоянной от соотношения масс взаимодействующих тел. С уменьшением соотношения масс гравитационная постоянная, по нашему мнению, должна увеличиваться, что должно быть наиболее заметно при неизменном расстоянии между телами.

Предлагаемый механизм вращательного движения может в виде гипотезы ответить на вопрос, почему в космосе за редким исключением стабильные орбиты имеют в основном крупные небесные тела. По нашему мнению, это происходит, потому что для малых объектов из-за малых размеров действие силы тяготения на дальние и ближние от центра тяготения точки мало различается по величине. В результате возникновение поворотного момента сил затруднено и действие его не достаточно эффективно. При недостаточном повороте линейная скорость малых небесных тел более эффективно гасится силой тяготения, как во вращающихся системах с низкой добротностью и небесные тела, в конце концов, падают к центру тяготения, либо удаляются от центрального тела безвозвратно, если их начальная скорость достаточно велика.

На этом специфика вращательного движения в небесной механике не заканчивается. Поворот обычных тел относительно собственного центра масс в процессе движения по окружности происходит в условиях механического ограничения со стороны связующего тела. В результате поворот тела движущегося по круговой орбите составляет один оборот вокруг собственной оси на один оборот вокруг центра кругового движения. В небесной механике движущееся по орбите небесное тело не имеет жесткой связи с центром тяготения, т.е. не имеет никаких ограничений при вращении вокруг собственной оси. Поэтому поворотный момент сил тяготения, по-видимому, может привести к вращению небесных тел вокруг своей оси в направлении движения по орбите (в прямом направлении) с большей угловой скоростью, чем угловая скорость движения тела по орбите, что, по всей видимости, может привести к дестабилизации орбитального движения.

Собственное вращение тела увеличивает орбитальную скорость удаленных от центрального тяготеющего тела точек движущегося по орбите тела, где сила тяготения сказывается меньше и уменьшает орбитальную скорость нижних точек, где сила тяготения сказывается сильнее. В результате собственное вращение небесных тел может привести к снижению их орбиты и медленному падению на центральное тяготеющее тело, т.к. удаление от центрального тяготеющего тела верхних точек, движущегося по орбите тела, не может скомпенсировать падения на центральное тело нижних его точек.

Все планеты Солнечной системы и само Солнце вращаются в одном и том же (прямом) направлении. Так же вращаются и большинство спутников за исключением группы малых спутников Юпитера (VIII, IX и XII), спутник Феб Сатурна и Тритон Нептуна. Они имеют не прямое, а обратное вращение. Но это скорее исключение требующее специальных исследований. Свое вращение большинство тел Солнечной системы, конечно же, получили не в результате захвата одного небесного тела другим, а в ходе образования Солнечной системы, которая, по-видимому, образовывалась из единого вращающегося газового облака. В результате все небесные тела и орбиты закручены в одну сторону. Во всяком случае, прямое вращение поддерживается и не противоречит также и механизму вращательного движения. Собственное вращение небесных тел, движущихся по орбитам относительно центрального тяготеющего тела, может привести к дестабилизации Солнечной системы. Однако существует и обратный процесс, противодействующий падению тел на центральное тяготеющее тело.

Скорость обтекания эфирным потоком верхней части вращающегося в прямом направлении тела выше, чем скорость обтекания нижней части тела, т.к. линейная скорость верхних точек тела направлена навстречу общему потоку эфира, а линейная скорость нижних точек совпадает с направлением потока. Кроме того линейная скорость верхней части тела, движущейся по внешней орбите выше чем линейная скорость нижней части тела, движущейся по внутренней орбите в силу разных радиусов вращения верхней и нижней частей небесного тела. При этом градиент давлений эфира направлен против силы тяготения и создаёт дополнительные условия для удержания тела на орбите, противодействуя силе тяготения, не скомпенсированной силой инерции движения тела по орбите из-за собственного вращения тела. Поэтому стабильность движения небесных тел по орбитам зависит от соотношения этих сил. Для небольших небесных тел из-за малого диаметра, беспорядочного вращения и неправильной формы воздействие мировой среды, по-видимому, неэффективно, поэтому в описанном противодействии побеждают силы тяготения. В результате малые тела быстрее снижаются к центральному тяготеющему телу. Но это лишь гипотеза. В современной науке этот вопрос остается открытым.

Таким образом, движение небесных тел зависит от множества факторов, что приводит к отклонению от закона всемирного тяготения Ньютона, который применим в основном для математических материальных точек. Когда французский математик Анри Пуанкаре попробовал исследовать стабильность планетной системы, опираясь лишь на законы Ньютона, он был поражен. Получалось, что Солнечная система была нестабильна и – в самой основе своей – хаотической. Одним из объяснений причин нестабильности и отклонения движения небесных тел от законов всемирного тяготения может быть пренебрежение реальными размерами тел и замена их математическими материальными точками. К сожалению, в научной литературе этот вопрос не достаточно освещен, хотя задуматься есть над чем.

3. ЯВЛЕНИЕ КОРИОЛИСА.

Густав Гаспар Кориолис (1792-1843 гг.) – французский математик и механик открыл силу инерции, названную впоследствии его именем. Она возникает в неинерциальной вращающейся системе отсчета. Он также вывел ее формулу.

Сила Кориолиса равна удвоенной радиальной скорости (V_p), умноженной на угловую скорость вращения (ω) и умноженную на синус угла между ними, а так же на испытуемую массу (М)

На протяжении двух столетий споры вокруг силы Кориолиса не прекращаются. Несмотря на официальную точку зрения, отраженную в учебниках физики, многие современные авторы высказывают свой взгляд на природу этого явления. Большинство из них называют силу Кориолиса силой инерции. Если учесть, что проявление любых сил в природе так или иначе связано с инерцией, то и про силу Кориолиса так же можно сказать, что это сила инерции. Однако такой подход не раскрывает физики явления.

Определение силы и ускорения Кориолиса достаточно непростая задача в плане определения физической сущности явления. Есть два крайних варианта сложного движения, в которых, как считается, проявляется ускорение Кориолиса. В первом варианте относительная скорость направлена вдоль радиуса вращающейся системы. Во втором варианте относительная скорость направлена перпендикулярно радиусу вращающейся системы, т.е. совпадает по направлению с линейной скоростью переносного вращения. В каждом из этих вариантов сила и ускорение Кориолиса проявляется по нашему мнению по-разному.

Рассмотрим вывод формулы ускорения Кориолиса различными авторами при сложном движении по каждому из этих вариантов в отдельности.

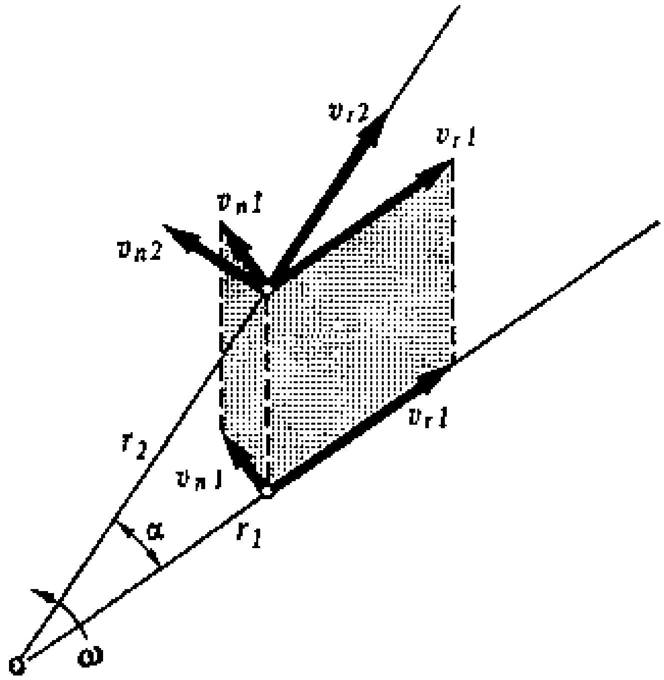
3.1. ПЕРВЫЙ ВАРИАНТ ПРОЯВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА. СКОРОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ НАПРАВЛЕНА ВДОЛЬ РАДИУСА ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ.

А. Н. Матвеев в работе «Механика и теория относительности», 3-е издание, Москва, «ОНИКС 21 век», «Мир и образование», 2003 г., допущенной в качестве учебника для студентов высших учебных заведений определяет ускорение Кориолиса следующим образом (см. фотокопии ниже).

66. Неинерциальные вращающиеся системы координат

Кориолисово ускорение. При рассмотрении неинерциальных систем координат, движущихся по прямой линии, соотношения между абсолютной, переносной и относительной скоростями и соответствующими ускорениями были совершенно одинаковыми [см. (64.2) и (64.3)]. У вращающихся систем дело обстоит сложнее. Отличие обусловливается тем, что переносная скорость различных точек вращающейся системы координат различна. Абсолютная скорость по-прежнему является суммой переносной и относительной скоростей:

$$\boxed{\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}',} \qquad (66.1)$$



159.

Ускорение Кориолиса обусловлено различным значением переносного ускорения в разных точках неинерциальной системы

а абсолютное ускорение в таком простом виде не представляется.

При перемещении из одной точки вращающейся системы координат в другую изменяется переносная скорость точки. Поэтому, если даже относительная скорость точки при движении не меняется, она должна испытывать ускорение, отличное от переносного. Это приводит к тому, что **для вращающихся систем координат в выражение для абсолютного ускорения помимо суммы переносного и относительного ускорения входит еще одно ускорение $\mathbf{w}_К$, называемое кориолисовым:**

$$\boxed{\mathbf{w} = \mathbf{w}_0 + \mathbf{w}' + \mathbf{w}_К.} \qquad (66.2)$$

Выражение для кориолисова ускорения. Для выяснения физической сущности кориолисова ускорения рассмотрим движение в плоскости вращения. Прежде всего нас интересует движение точки с постоянной относительной скоростью вдоль радиуса (рис. 159). На рис. 159 указаны положения точки в два момента времени, разделенных промежутком Δt, в течение которого радиус повернется

!

Кориолисова сила, как сила инерции, направлена противоположно кориолисову ускорению и приложена к телу.

!

Возможность разложения угловой скорости на составляющие обусловлена векторной природой угловой скорости.

на угол $\Delta\alpha = \omega\Delta t$. Скорость вдоль радиуса v_r изменяется за это время по направлению, а скорость v_n, перпендикулярная радиусу, изменяется как по направлению, так и по абсолютному значению. Полное изменение составляющей скорости, перпендикулярной радиусу, равно

$$\Delta v_n = v_{n2} - v_{n1}\cos\alpha + v_r\,\Delta\alpha = \omega r_1 - \omega r_2 \cos\alpha + v_r\,\Delta\alpha \approx \\ \approx \omega(r_2 - r_1) + v_r\omega\,\Delta t = \omega\,\Delta r + v_r\omega\,\Delta t, \tag{66.3}$$

где учтено, что $\cos\alpha \approx 1$.

Следовательно, кориолисово ускорение

$$w_K = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \omega\frac{dr}{dt} + v_r\omega = 2v_r\omega. \tag{66.4}$$

В векторном виде это выражение, как это непосредственно видно из соотношения направлений различных величин на рис. 159, можно представить следующим образом:

$$\mathbf{w}_K = 2[\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}'], \tag{66.5}$$

где $\mathbf{v}'$ — относительная скорость, в данном случае направленная вдоль радиуса.

В случае движения точки перпендикулярно радиусу, т. е. по окружности, относительная скорость $v' = \omega r$, а угловая скорость вращения точки в неподвижной системе координат равна $\omega + \omega'$, где ω — угловая скорость вращающейся системы координат. Для абсолютного ускорения получаем следующее выражение:

$$w = (\omega + \omega')^2 r = \omega^2 r + \omega'^2 r + 2\omega\omega' r. \tag{66.6}$$

Первый член в правой части представляет переносное ускорение, второй член — относительное ускорение. Последний член $2\omega\omega' r = 2\omega v'$ является кориолисовым ускорением. Все ускорения в (66.6) направлены вдоль радиуса к центру вращения. С учетом направления кориолисово ускорение в (66.6) может быть записано в виде

$$\boxed{\mathbf{w}_K = 2[\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}'],} \tag{66.7}$$

где $\mathbf{v}'$ — относительная скорость, в данном случае направленная перпендикулярно радиусу.

Произвольная скорость может быть выражена в виде суммы слагающих, направленных по радиусу и перпендикулярно ему, и для обеих составляющих справедлива одна и та же формула вида (66.7). Отсюда следует, что формула (66.7) справедлива для кориолисова ускорения при произвольном направлении относительной скорости.

Если скорость направлена параллельно оси вращения, то никакого кориолисова ускорения не возникает: поскольку при этом соседние точки траектории имеют одинаковую переносную скорость.

Можно получить выражение для кориолисова ускорения более формальным путем — прямым вычислением абсолютного ускорения. Записав радиус-вектор движущейся точки в виде

$$\mathbf{r} = \mathbf{i}'x' + \mathbf{j}'y' + \mathbf{k}'z' \tag{66.8}$$

и дифференцируя по t с учетом зависимости $\mathbf{i}'$, $\mathbf{j}'$, $\mathbf{k}'$ от времени так же, как это было сделано в § 52, получим для абсолютной скорости следующее выражение:

$$\mathbf{v} = [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{r}] + \mathbf{v}' = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}', \tag{66.9}$$

где $[\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{r}] = \mathbf{v}_0$ — переносная скорость, а

$$\mathbf{v}' = v'_x\mathbf{i}' + v'_y\mathbf{j}' + v'_z\mathbf{k}' \tag{66.10}$$

— относительная скорость. Отсюда находим абсолютное ускорение:

$$\mathbf{w} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left[\boldsymbol{\omega},\ \frac{d\mathbf{r}}{dt}\right] + \frac{d\mathbf{v}'}{dt} = [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}'] + \mathbf{w}' + [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}'], \tag{66.11}$$

причем угловая скорость вращения считается постоянной и учтено что

$$\frac{d\mathbf{v}'}{dt} = \frac{dv'_x}{dt}\mathbf{i}' + \frac{dv'_y}{dt}\mathbf{j}' + \frac{dv'_z}{dt}\mathbf{k}' + v_x\frac{d\mathbf{i}'}{dt} + v'_y\frac{d\mathbf{j}'}{dt} + v'_z\frac{d\mathbf{k}'}{dt} =$$

$$= \mathbf{w}' + [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}']. \tag{66.12}$$

Поэтому абсолютное ускорение

$$\mathbf{w} = \mathbf{w}_0 + \mathbf{w}' + \mathbf{w}_K, \tag{66.13}$$

где $\boldsymbol{\omega}_0 = [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}_0] = [\boldsymbol{\omega},\ [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{r}]]$ — переносное ускорение, $\mathbf{w}' = \frac{dv'_x}{dt}\mathbf{i}' + \frac{dv'_y}{dt}\mathbf{j}' + \frac{dv'_z}{dt}\mathbf{k}'$ — относительное ускорение, $\mathbf{w}_K = 2\,[\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{v}']$ — кориолисово ускорение. Переносное ускорение целесообразно представить в виде

$$\mathbf{w}_0 = [\boldsymbol{\omega}, [\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{r}]] = \boldsymbol{\omega}\,(\boldsymbol{\omega},\ \mathbf{r}) - \mathbf{r}\omega^2 = \omega^2\,(\mathbf{d} - \mathbf{r}) = -\omega^2\mathbf{R}, \tag{66.14}$$

где $\mathbf{R}$ есть вектор, перпендикулярный оси вращения (рис. 160). Таким образом, переносное ускорение является центростремительным (напомним, что угловая скорость вращения считается постоянной).

Книга написана в соответствии с программой курса физики для университетов, однако, физики в данном учебнике нисколько не больше, чем во многих других современных учебниках по физике. Форма написания книги больше соответствует справочной литературе по физике, в которой приводятся количественные описания физических явлений без их подробного обоснования.

Матвеев пытается выяснить «*физическую сущность кориолисова ускорения*», как он сам пишет на странице 403 своей книги. Однако все принципиальные выводы, касающиеся физики явления Кориолиса, подробно не анализируются. Механизм действия ускорения Кориолиса не раскрыт. Все спорные и противоречивые моменты остаются без доказательства и разъяснений. Зато большое внимание уделено математическим преобразованиям, за которыми не всегда виден физический смысл явлений. Хотя в физике все должно быть наоборот. Наибольшее внимание в **учебной литературе**, на наш взгляд, следует уделять обоснованию изложенных позиций с физической точки зрения. Именно физический смысл явления, должен принципиально определять математические выражения, которые описывают физическое явление лишь с количественной стороны.

Ускорение Кориолиса по Матвееву это изменение скорости тела, движущегося радиально внутри вращающейся системы, **в направлении, перпендикулярном радиусу вращения.** Это общепринятое в классической физике определение ускорения Кориолиса в рассматриваемом варианте. На стр. 404 Матвеев пишет: *«Скорость вдоль радиуса Vr изменяется за это время* (Δt) *по направлению, а скорость Vn, перпендикулярная радиусу, изменяется как по направлению, так и по абсолютному значению.* ***Полное изменение составляющей скорости, перпендикулярной радиусу, равно***

$$\Delta Vn = Vn_1 - Vn_2 * \cos\alpha + Vr*\Delta\alpha \approx \omega*\Delta r + Vr*\omega*\Delta t \qquad (66.3)$$

где учтено, что $\cos\alpha \approx 1$

Следовательно, кориолисово ускорение

$$w_к = \omega*\Delta r/dt + Vr*\omega = 2*Vr*\omega».$$

Однако приведённая формулировка не является строгой ни физически, ни лингвистически, что может быть вызвано, по-видимому, нечёткими представлениями автора и классической физики в целом о природе ускорения Кориолиса.

Во-первых, в определении существует неопределённость в отношении (ΔVn): то ли это *«полное изменение составляющей»* **абсолютной** «*скорости, перпендикулярной радиусу*», то есть не что иное, как полное изменение линейной скорости переносного вращения, которое в таком случае не соответствует выражению (66.3). То ли это изменение **составляющих** (Vn) и (Vr) абсолютной скорости (Va) **в направлении**, **перпендикулярном** радиусу, что соответствует классическому приращению поворотного движения. Причём вопреки всякой логике чисто лингвистически более очевидна первая версия толкования приведённой формулировки, т.к. в определении говорится именно о *«составляющей скорости,* ***перпендикулярной*** *радиусу…».* Возможно это простая опечатка издательства, однако расплывчатость и нечёткость формулировок наблюдается, как это ни странно, практически у всех авторов, так или иначе касающихся вопросов поворотного движения.

Во-вторых, в формулировке чётко обозначено одно из противоречий вращательного движения в классической физике, в соответствии с которым направление вектора ускорения вращательного движения не совпадает с направлением вектора линейной скорости. То есть сущность ускорения Кориолиса Матвеев пытается обосновать на основе противоречивых классических представлений о вращательном движении, которые сами нуждаются в физическом обосновании.

В классической физике изменение абсолютной величины вектора скорости не связано с изменением его направления и наоборот изменение направления вектора скорости не связано с изменением его абсолютной величины, как, например, во вращательном движении. Тем самым обозначена грань между физической природой изменения скорости по величине и изменения скорости по направлению, хотя в природе нет специфических сил, которые могут изменять движение либо только по направлению, либо только по величине. Противоречивые представления классической физики о направлении ускорения криволинейного движения заложены, по всей видимости, и в основу классической модели поворотного движения.

Из выражения (66.3) следует, что ускорение Кориолиса это изменение абсолютной скорости в направлении перпендикулярном радиусу, которое состоит из двух самостоятельных составляющих:

1. **ускорения линейной скорости переносного движения по абсолютной величине;**
2. **ускорения радиальной скорости относительного движения по направлению.**

То есть, кроме линейного ускорения в направлении скорости, перпендикулярной радиусу, в состав классического ускорения Кориолиса входит центростремительное ускорение по изменению направления относительной скорости. В направлении перпендикулярном радиусу тело движется с линейной скоростью переносного вращения. Это единственная скорость, перпендикулярная радиусу в составе абсолютной скорости. Следовательно, с точки зрения классической физики и здравого смысла любые ускорения, действующие в указанном направлении должны непременно **привести к изменению величины скорости (Vn)**, а приращение скорости (Vn) является в таком случае полным приращением скорости в направлении перпендикулярном радиусу».

Однако в классической модели поворотного движения ускорение по изменению направления относительной скорости никак не сказывается на величине приращения линейной скорости переносного вращения, в направлении которой действует центростремительное ускорение, а линейное ускорение в направлении переносного вращения не сказывается на приращении радиальной скорости относительного движения по направлению, что противоречит здравому смыслу. Зато отсутствие линейного приращения движения в направлении действия центростремительного ускорения в составе ускорения Кориолиса хорошо согласуется с классической моделью вращательного движения.

С классической точки зрения центростремительное ускорение вращательного движения не даёт линейного приращения в направлении своего действия, а только изменяет направление движения. Радиус вращения, в направлении которого действует центростремительное ускорение, является величиной постоянной. Таким образом, противоречие вращательного движения автоматически становится противоречием и поворотного движения, т.к. оправдывает присутствие в составе классического ускорения Кориолиса самостоятельного центростремительного ускорения по изменению направления радиальной скорости, которое почему-то не влияет на изменение абсолютной величины линейной скорости переносного вращения, в направлении которой действует линейное центростремительное ускорение.

Рассмотрим структуру поворотного ускорения, которое приводит к изменению радиальной скорости относительного движения по направлению и изменению абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного вращения по величине (см. Рис. 3.1). Тело (B) совершает радиальное относительное движение вдоль радиуса переносного вращения, при котором на него действует сила Кориолиса. В результате тело совершает поворотное движение с ускорением Кориолиса. С классической точки зрения при этом проявляется сразу два самостоятельных ускорения: центростремительное ускорение по изменению направления радиальной скорости относительного движения (*а*ц.с.) и линейное ускорение (*а*л) в направлении линейной скорости переносного вращения (Рис.3.1«а»). С нашей точки зрения приращение этих скоростей происходит за счёт одного и того же ускорения (*а*к) (Рис.3.1«б»).

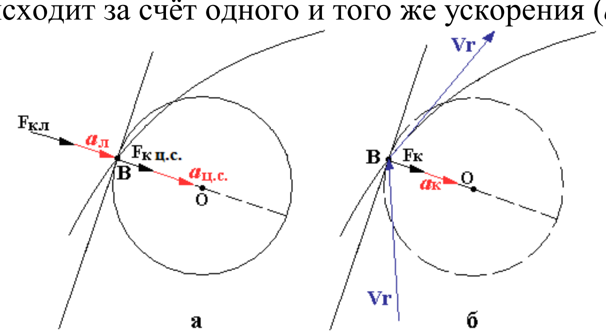


Рис. 3.1

В основе механизма изменения направления любого линейного движения лежит механизм отражения. Из элементарных отражений состоит и вращательное движение. Каждое отдельное изменение радиальной скорости по направлению и изменение скорости движения тела в направлении линейной скорости переносного вращения по абсолютной величине при элементарном отражении вызваны одним и тем же ускорением. Поэтому линейное ускорение, проявляющееся при элементарном отражении, может быть отнесено как к ускорению линейного движения в направлении, перпендикулярном отражающей поверхности, так и к ускорению завершённого цикла вращательного движения в одной из его точек.

Изменение направления радиальной скорости относительного движения и изменение абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного вращения возникают в процессе поворотного движения при появлении силы Кориолиса **одномоментно**. Ни одно из этих движений не существует до возникновения другого. Однако классическое ускорение Кориолиса по своему физическому смыслу предполагает существование вращательного движения с линейной скоростью, равной радиальной скорости ещё до появления силы Кориолиса. Дело в том, что при элементарном отражении условно возникает только одно линейное ускорение. Сложение же ускорений осуществляется только в том случае, если есть что складывать, следовательно, второе слагаемое классического ускорения Кориолиса должно существовать ещё до появления силы Кориолиса. Только при условии предварительного существования центростремительного ускорения относительной скорости можно физически обосновать сложение ускорений вращательного движения вектора радиальной скорости и линейного движения в направлении вектора линейной скорости переносного вращения.

При линейном точечном силовом воздействии может возникнуть только линейное движение, которое может являться элементом других видов движения, но не разные движения. Линейное ускорение, возникающее при отражении не с чем складывать, т.к. какое-либо другое ускорение в поворотном движении до взаимодействия тела с направляющей и появления силы Кориолиса отсутствует. Однако ускорение, возникающее в момент отражения, приводит к приращению, которое характерно для двух видов движений одновременно. При этом линейное ускорение может являться ускорением вращательного движения лишь короткое время в одной из его точек. Для одновременного сколько-нибудь длительного поддержания этих двух видов движения одной и той же линейной силы недостаточно. Для каждого вида движения необходима своя индивидуальная сила, характер воздействия которой соответствует своему виду движения.

В каждом элементарном отражении радиальной скорости от направляющей одновременно формируются линейное ускорение и ускорение направления, как различные проявления единого ускорения отражения. После завершения действия ускорения элементарного отражения наступает фаза движения тела по инерции с установившейся линейной скоростью, в которой приращение обоих видов движения прекращается. Однако в каждой новой точке взаимодействия тела с направляющей вновь формируется ускорение отражения в результате действия, которого возобновляются приращения обоих видов движений.

Таким образом, за счёт непрерывной последовательности отражений создаётся иллюзия длительного непрерывного осуществления приращения двух видов движения одновременно за счёт одной и той же силы и одного и того же ускорения, что фактически не соответствует действительности, - в каждом взаимодействии осуществляя только один вид движения. Поскольку автоколебательный процесс вращательного движения радиальной скорости чередуется с достаточно длительными периодами движения по инерции, то вращательное движение радиальной скорости как таковое отсутствует. Существуют лишь отдельные разрозненные элементарные отражения, которые действительно одновременно приводят к приращению линейной скорости переносного вращения и повороту относительной скорости, но только лишь в одной отдельно взятой точке траектории поворотного движения.

Ускорение Кориолиса, так же как и ускорение вращательного движения является понятием обобщённым академическим и характеризуется средним ускорением **законченного цикла** формирования ускорения Кориолиса. Это такая же обобщенная, на наш взгляд, физическая величина, как и центростремительное ускорение, которое формируется в результате циклически повторяющегося физического процесса. В каждом цикле формирования ускорения Кориолиса происходит авторегуляция величины ускорения Кориолиса, так же как во вращательном движении происходит авторегуляция центростремительного ускорения. Отличие состоит только в том, что ускорение Кориолиса формируется, как последовательность законченных разрозненных циклов вращательного движения, в результате чего вращательное движение преобразуется в поворотное движение. В поворотном движении циклы вращательного движения имеют одинаковые параметры только в начале и в конце цикла формирования ускорения Кориолиса. Внутри цикла формирования ускорения Кориолиса циклы вращательного движения имеют разные физические параметры.

В основе ускорения Кориолиса также как и во вращательном движении лежит механизм элементарных отражений. Обобщенное ускорение направления вращательного движения в нашей версии также как и ускорение Кориолиса изменяет направление линейной скорости и одновременно обеспечивает движение вдоль радиуса в направлении центра вращения. Однако никто не утверждает, что центростремительное ускорение состоит из двух независимых ускорений: ускорения вращательного движения и линейных радиальных ускорений. Поэтому нет никаких оснований подразделять на два самостоятельных ускорения и обобщенное ускорение Кориолиса.

Вопрос поступательного движения в направлении действия ускорения предполагаемого вращательного движения вектора радиальной скорости, которое в классическом вращательном движении отсутствует, решается в поворотном движении за счёт более длительного по времени инерционного движения с промежуточной внутрицикловой линейной скоростью между циклами изменения направления линейной скорости по сравнению с вращательным движением.

Во вращательном движении процесс преобразования прямолинейного движения во вращательное движение осуществляется практически непрерывно, когда радиальное движение от центра вращения тут же сменяется движением к центру вращения в следующем цикле, поэтому радиальное движение в среднем равно нулю. В поворотном движении кратковременное обратное движение в пределах элементарного цикла отражения не играет никакой роли для общего достаточно длительного поступательного движения тела по инерции, полученного после отражения. Обратное движение компенсирует только ускоренное движение тела в направлении предполагаемого центра вращения Движение же по инерции в сторону центра вращения длительное время остаётся ни чем не скомпенсированным до следующего достаточно отдалённого по времени взаимодействия.

Несоответствие прироста скорости движения тела в направлении, перпендикулярном радиусу переносного вращения, величине классического ускорения Кориолиса или отсутствие конкретного, четко обозначенного физического эквивалента приращения относительной скорости по направлению в классическом ускорении Кориолиса не единственное возражение против классической модели поворотного движения. В классической физике остается неразрешенным вопрос о строгом соответствии друг другу двух составляющих классического ускорения Кориолиса по величине. Все авторы, занимающиеся изучением явления Кориолиса, не только не пытаются объяснить этот факт, **но даже не ставят такой вопрос!** Хотя этот вопрос неизбежно должен возникнуть именно в классической физике, в которой ускорение Кориолиса состоит из двух самостоятельных одинаковых по величине и направлению ускорений, принадлежащих к разным видам движения.

Это один из примеров чисто описательного феноменологического и математического подхода к изучению физического явления. Между тем ответ на этот вопрос, по нашему мнению, очень важен для определения физической сущности явления Кориолиса. Два равнозначных ускорения, действующих синхронно в одном и том же направлении и обеспечивающие одно и то же реальное (фактическое) приращение движения не могут являться составляющими какого-то равнодействующего ускорения, т.к. речь в этом случае может идти только об одной и той же физической величине. Если допустить, что ускорение по изменению направления относительной радиальной скорости и ускорение по изменению абсолютной величины линейной скорости переносного движения это одна и та же физическая величина, то вопрос о количественном и физическом равенстве этих ускорений разрешается естественным образом. Строгое соответствие прироста абсолютной скорости тела в направлении переносного вращения с приростом переносной скорости и с приростом относительной скорости по направлению непосредственно вытекает из физической природы ускорения Кориолиса. Ниже предложен возможный физический механизм формирования и саморегуляции ускорения Кориолиса в нашей версии.

В отсутствие радиального относительного движения линейная скорость тела, находящегося на направляющей равна линейной скорости переносного вращения в соответствующей точке направляющей (см. Рис..3.2, поз.I), т.е. относительная скорость тела и направляющей равна нулю. При этом тело испытывает только ускорение переносного вращения, а средняя величина линейной скорости переносного вращения неизменна. Если сообщить телу прямолинейное движение вдоль направляющей с относительной скоростью (Vотн), то это неизбежно приведет к дополнительному взаимодействию тела с направляющей.

В результате переносного вращения направляющая поворачивается относительно вектора радиальной скорости тела (Vотн) на некоторый угол (см. Рис.3.2, поз.II). При взаимодействии тела, движущегося с радиальной скоростью вдоль неизменного геометрического радиуса и повернувшейся на некоторый угол направляющей, относительная скорость тела и направляющей не равна нулю и зависит от скорости радиального движения тела и угловой скорости переносного вращения, т.е. от угла между вектором радиальной скорости и направляющей. Взаимодействие тела с направляющей с началом относительного движения эквивалентно отражению тела, движущегося под углом к неподвижной отражающей поверхности с суммарной скоростью сближения. Это взаимодействие является началом полного цикла взаимодействий тела с направляющей, определяющего механизм формирования и саморегуляции ускорения Кориолиса.

Под полным циклом формирования ускорения Кориолиса следует понимать цикл взаимодействий тела с направляющей после завершения, которого скорость относительного движения направлена вдоль текущего радиуса переносного вращения, а нормальная составляющая абсолютной скорости равна линейной скорости переносного вращения в точке, в которой в данный момент находится тело.

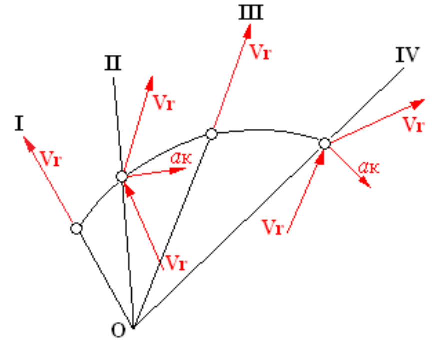


Рис. 3.2

Мгновенное значение ускорения, полученного телом в момент взаимодействия с направляющей, может быть значительно больше наблюдаемого среднего за цикл ускорения в направлении линейной скорости переносного вращения или ускорения по изменению направления относительной радиальной скорости. Однако действие этого ускорения меньше времени полного цикла взаимодействия, т.к. под действием приобретенного ускорения тело на некоторое время «отделяется» от направляющей и далее до нового промежуточного взаимодействия внутри полного цикла взаимодействий движется по инерции без ускорения.

Под «отделением» тела от направляющей следует понимать не полный отрыв тела от направляющей с заметным на макроуровне зазором. Все происходит на микроуровне. Во всяком случае, контакт тела с направляющей после однократного акта взаимодействия значительно ослабевает. Это определяет дальнейшее движение тела в новом направлении преимущественно по инерции. Таким образом, какие бы значения не принимало ускорение Кориолиса внутри цикла, среднее за цикл ускорение Кориолиса равно отношению полного за цикл приращения скорости движения тела в направлении действующего ускорения Кориолиса ко времени длительности полного цикла формирования ускорения Кориолиса.

После отражения тело продолжает движение под некоторым углом к направляющей с постоянной по величине скоростью. При этом движение тела происходит как в нормальном, так и в радиальном направлении. В то время как точка вращающейся системы, находящаяся на направляющей и пространственно соответствующая радиальному продвижению тела, движется с возрастающей линейной скоростью переносного вращения. Именно за счет прироста линейной скорости переносного вращения точки вращающейся системы, находящейся на направляющей и соответствующей текущему положению тела относительно радиуса переносного вращения и преодолевается разница скоростей тела, получившего прирост скорости за счет мгновенного ускорения Кориолиса, и скорости соответствующей точки переносного вращения.

Направляющая как бы догоняет тело, движущееся к тому времени преимущественно по инерции, в новой точке вращающейся системы (см. Рис.3.2,поз.III). Причем ускорение точки на направляющей соответствующей радиальному продвижению тела происходит не за счет ускорения Кориолиса. В соответствии с классическими представлениями современной физики скорость и ускорение любой точки вращающейся системы является скоростью и ускорением непосредственно переносного движения, т.е. это чисто геометрические параметры движения математической нематериальной точки, принадлежащей переносному вращению на текущем радиусе переносного движения.

Если направление вектора относительной скорости при движении тела по инерции после каждого взаимодействия внутри полного цикла взаимодействий какое-то время остается неизменным, то направляющая в составе вращающейся системы постоянно изменяет свое угловое положение относительно неизменного по направлению вектора радиальной скорости тела. То есть угол между вектором радиальной скорости в новом направлении и направляющей в процессе переносного вращения уменьшается. Направляющая догоняет тело не только вдоль вектора линейной скорости переносного движения, но и по направлению. После выравнивания угловых положений вектора относительной скорости и направляющей и выравнивания нормальной к радиусу скорости тела и скорости соответствующей точки вращающейся системы на направляющей в этом же направлении, цикл формирования ускорения Кориолиса завершается (см. Рис.3.2,поз.III).

К моменту начала нового цикла скорость «отражающей поверхности» соответствует скорости тела, достигнутой, за счёт линейного ускорения в предыдущем цикле. Поскольку скорости тела и отражающей поверхности в начале каждого цикла равны, то каждый цикл эквивалентен одному элементарному отражению радиальной скорости от неподвижной отражающей поверхности. Это обеспечивает неизменность радиальной скорости по величине по завершению каждого цикла и неизменность начальных условий в начале каждого цикла формирования ускорения Кориолиса.

Если направляющая «догонит» тело раньше, того момента, когда угол между вектором относительной скорости и направляющей станет равным нулю, а их нормальные скорости сравняются, то при их контакте тело получит дополнительное ускорение направления. Причем величина ускорения при новом взаимодействии меньше величины ускорения в момент первого контакта тела с направляющей, так как движение соответственной точки на направляющей и тела осуществляются в этот момент в попутном направлении. Поскольку дополнительное ускорение будет меньше первоначального, то следующий контакт тела с направляющей произойдет при еще меньшей разности нормальных скоростей тела и соответствующей точки на направляющей и меньшем угле между направляющей и вектором относительной скорости. Так будет происходить до тех пор, пока угол между направляющей и вектором относительной скорости при их взаимодействии не станет равным нулю, а нормальная скорость тела и соответствующей точки на направляющей не сравняются по величине, после чего полный цикл формирования ускорения Кориолиса завершится.

Таким образом, в серии элементарных отражений большей или меньшей силы с разными углами падения и отражения внутри законченного цикла формирования ускорения Кориолиса достигается прирост абсолютной скорости тела в направлении линейной скорости переносного вращения до текущей величины вектора скорости переносного вращения. А также достигается изменение направления радиальной скорости относительного движения, соответствующее текущему угловому положению направляющей. После полного выравнивания угловых положений вектора относительной скорости и направляющей и их нормальных скоростей цикл формирования ускорения Кориолиса завершается (Рис.3.2,поз.III).

Поскольку в конце каждого цикла нормальные скорости движения тела и соответствующей точки на направляющей в результате действия механизма формирования ускорения Кориолиса **равны**, то среднее за цикл ускорение Кориолиса строго соответствует приросту линейной скорости непосредственно переносного вращения на текущем радиусе вращения. При этом приращение скорости движения тела в направлении линейной скорости переносного вращения по абсолютной величине происходит за счёт изменения направления радиальной скорости относительного движения и наоборот.

Если в момент первого взаимодействия тело и соответствующая точка направляющей имеют разные нормальные скорости и разные угловые положения вектора относительной скорости и текущего положения направляющей, то в соответствии с описанным выше механизмом произойдет выравнивание этих параметров. После того как нормальные скорости тела и соответствующей точки на направляющей и угловое положение вектора относительной скорости и текущего положения направляющей сравняются, - возобновятся нормальные циклы формирования ускорения Кориолиса.

Вращательное движение тела, связанного с центром вращения связующим телом является относительно непрерывным и равномерным процессом по изменению величины и направления линейной скорости. В рассматриваемом сложном движении циклы вращательного движения периодически прерывается более протяженными участками равномерного прямолинейного движения по инерции, чем во вращательном движении. «Центростремительное ускорение» такого вращения (мгновенное ускорение Кориолиса) чередуется с прямолинейными участками равномерного движения по инерции, когда тело «отрывается» от направляющей и некоторое время движется самостоятельно по инерции. Поэтому центростремительное ускорение такого «прерывистого» вращения сообщает телу при каждом последующем взаимодействии с направляющей движение каждый раз к новому центру условной окружности, по которой предполагается движение тела с радиальной скоростью (Рис. 3.3). На Рис.3.3 предполагаемая окружность, по которой в классической версии поворотного движения тело движется с радиальной скоростью относительного движения, показана пунктиром.

Предложенный механизм поворотного движения тела под действием ускорения Кориолиса полностью соответствует современным представлениям теоретической механики об общем случае сложного движения твердого тела по криволинейной траектории, которое рассматривается как поступательные продвижения, чередующиеся с элементарными поворотами вокруг мгновенных осей вращения.

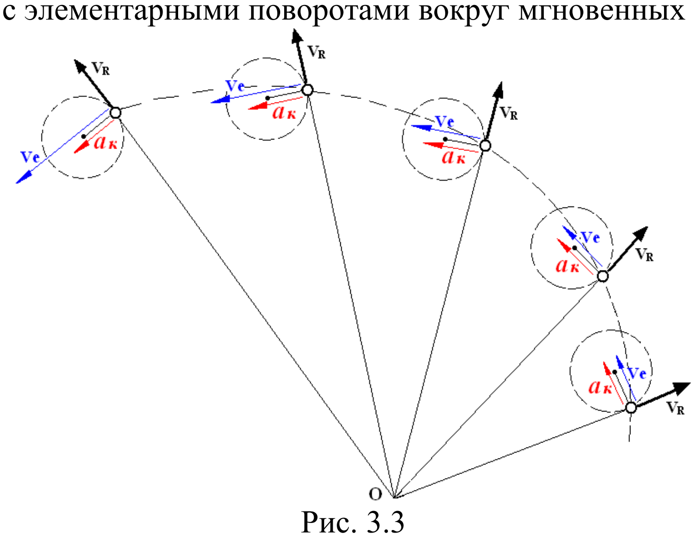


Рис. 3.3

Можно также математически показать, что ускорение по изменению переносной скорости по абсолютной величине и ускорение по изменению направления радиальной скорости относительного движения это одно и то же ускорение. Приращение радиальной скорости относительного движения по направлению равно:

$\Delta Vr = Vr*\Delta\alpha = Vr*\omega*\Delta t$

Это выражение соответствует третьему члену выражения (66.3)

Произведение ($Vr^* \Delta t$) в выражении для (ΔVr) есть не что иное, как изменение радиуса переносного вращения (Δr). Тогда выражение для (ΔVr) можно записать в виде:

$\Delta Vr = Vr^*\Delta\alpha = Vr^*\omega^*\Delta t = (Vr^* \Delta t)^*\omega = \mathbf{\Delta r^*\omega}$

Но **($\Delta r^*\omega$)** есть не что иное, как прирост линейной скорости переносного движения в связи с изменением радиуса переносного вращения:

$\mathbf{\Delta V\text{л} = r_2{}^*\omega - r_1{}^*\omega = (r_2 - r_1) = \Delta r^*\omega}$

Тогда:

$\mathbf{\Delta Vr = \Delta V\text{л}}$

Аналогичным образом можно показать, что прирост абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного вращения по абсолютной величине есть не что иное как прирост радиальной скорости относительного движения по направлению.

$\mathbf{\Delta V\text{л}} = Vn_2 - Vn_1 = \omega^*r_2 - \omega^*r_1 = \omega^*\Delta r = \omega^*(Vr^* \Delta t) = Vr^*(\omega^* \Delta t) = =Vr^*\Delta\alpha = \mathbf{\Delta Vr}$

То есть:

$\mathbf{\Delta V\text{л} = \Delta Vr}$

Следовательно, ускорение Кориолиса ($w_\text{к}$) равно:

$\boldsymbol{w_\text{к}} = \mathbf{\Delta V\text{л} = \Delta Vr = \omega^*Vr}$

Ускорение тела может быть определено различными математическими и физическими методами, но это не значит, что реальное ускорение тела будет состоять из суммы ускорений, найденных различными методами. Самостоятельные независимые ускорения могут быть равны между собой количественно. Полное же совпадение физических формул ускорений, в которых присутствуют **одни и те же физические величины** и которые не могут быть выражены в виде суммы, состоящей из разных физических величин, свидетельствует о том, что речь идет об одном и том же ускорении, найденном различными методами. Таким образом, в классическом ускорении Кориолиса **одна и та же физическая величина учтена дважды.**

По своей физической сущности ускорение Кориолиса, является ускорением взаимного влияния переносного и относительного движений друг на друга. Ускорение Кориолиса одинаково обусловлено как переносным движением, в результате которого происходит увеличение линейной скорости переносного вращения, так и относительным движением, скорость которого во взаимодействии с переносным движением изменяется по направлению. Ускорение Кориолиса является общей частью переносного и относительного движений.

Переносное и относительное ускорение тела в сложном движении отличаются от переносного и относительного ускорения тела в каждом из этих движений в отдельности на величину ускорения, определяющегося их взаимным влиянием друг на друга, т.е. на величину ускорения Кориолиса. Переносное ускорение тела в сложном движении это сумма переносного ускорения тела в отсутствии относительного движения и ускорения Кориолиса. Соответственно относительное ускорение тела в сложном движении это сумма относительного ускорения тела в отсутствии переносного движения и ускорения Кориолиса. Абсолютное ускорение не равно простой сумме переносного движения с учетом относительного движения и относительного движения с учетом переносного движения, поскольку при прямом математическом сложении общая часть этих ускорений будет учтена дважды.

К выводу формулы ускорения Кориолиса в её классическом варианте приложили усилия множество авторов. При этом никто из них почему-то не отметил никаких противоречий, физически вытекающих из классической формулы ускорения Кориолиса. В частности отсутствие физического эквивалента приращения относительной радиальной скорости по направлению, хотя в приращении поворотного движения другого эквивалента поворотного ускорения, кроме приращения абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного движения по величине нет. Несмотря на любые противоречия, все выводы формулы ускорения Кориолиса, основанные на самых различных физических методах, неизменно привязаны к конечному результату, определяющемуся исторически сложившейся величиной ускорения Кориолиса.

В выводе формулы для ускорения Кориолиса представленном в «Справочнике по физике для высшей школы» (см. ниже Рис. 3.4) ускорение Кориолиса определяется как ускорение эквивалентного прямолинейного равноускоренного движения по формуле пути (S) для прямолинейного равноускоренного движения.

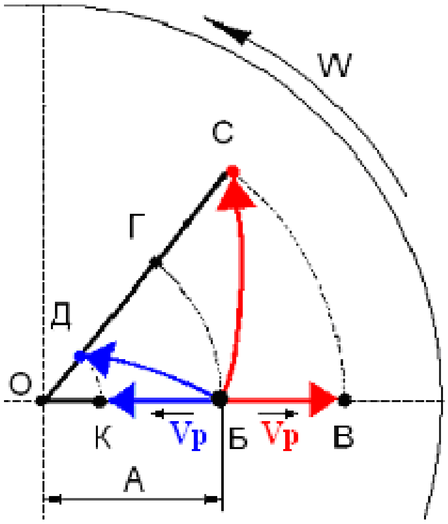


Рис. 3.4

«*Пусть тело (Б), находящееся на расстоянии (А) от неподвижной точки (О), движется в направлении точки (В) со скоростью (Vр). При отсутствии вращения тело (Б) через время (t) оказалось бы в точке (В). Так как направляющая (ОВ), вдоль которой движется тело, вращается в направлении (С), то фактически через время (t) тело (Б) окажется в точке (С) пройдя путь равный дуге окружности (ВС)»* («Справочник по физике для высшей школы»).

Таким образом, по сути дела ускорение Кориолиса предлагается определить через девиацию поворотного движения, т.е. через отклонение радиального движения в отсутствии поворотного ускорения от реальной траектории движения с учётом поворотного ускорения. Девиация это академическое отклонение тела от реальной траектории движения в случае прекращения действия ускорения за период движения без ускорения. Чтобы вернуть тело после движения с постоянной скоростью, которую тело имело на момент прекращения действия ускорения на реальную траекторию движения необходимо обеспечить телу такое же приращение движения, дефицит которого образуется за время отсутствия ускорения. Очевидно, что ускорение по преодолению девиации, образующейся в достаточно малом интервале времени соответствует реальному ускорению криволинейного движения.

Девиация в общем случае криволинейного движения является абстрактной академической траекторией, которая физически не совпадает с траекторией реального движения. Отклонение тела от реальной траектории за счёт отложенного ускорения определяется по кратчайшему расстоянию между соответствующими точками на траектории инерционного движения и реальной криволинейной траектории. Представление реальной траектории движения через девиацию является по сути дела академическим разложением реальной траектории движения на участки, пройденные по инерции за счёт достигнутой к определённому моменту времени скорости, и участки, пройденные телом с реальным ускорением. При этом полученные при разложении реальные участки траектории перераспределяются и группируются по видам движения на траекторию инерционного движения и академическую траекторию ускоренного движения, которые образуют геометрическую сумму равную реальной траектории абсолютного движения.

Главным условием определения ускорения криволинейного движения, в том числе и поворотного движения через академический отрезок девиации является строгое соответствие девиации элементарным участкам реальной траектории, пройденным за счёт реального ускорения. Бесконечно малые элементы девиации любого криволинейного движения, будучи соответствующим образом, встроенными в прямую, пройденную без ускорения должны фактически обеспечивать возможность трансформации траектории движения тела в отсутствии ускорения в реальную траекторию движения. Однако величина девиации поворотного движения в классической физике не соответствует элементарным участкам реальной траектории, пройденным с поворотным ускорением.

Девиация поворотного движения имеет свои специфические особенности. Движение в отсутствии поворотного ускорения при образовании девиации в поворотном движении может осуществляться не только по инерции, как в общем случае криволинейного движения, но и с ускорением. Причём отклонение от реальной траектории **в** поворотном движении определяется не по кратчайшей прямой, как в общем случае криволинейного движения, а по дуге окружности отложенного поворотного движения. Девиация поворотного движения образуется вдоль траектории переносного вращения. Часть общего отклонения от реальной траектории при прекращении действия поворотного ускорения достигается за счёт начальной линейной скорости переносного вращения. Поэтому при определении девиации поворотного движения необходимо на каждом участке траектории, на котором определяется девиация учитывать начальную линейную скорость переносного вращения.

На Рис. 3.5 схематично изображена структура девиации поворотного движения. Движение в соответствии с кривой (БС) осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В каждом секторе, соответствующем минимальному интервалу времени дифференцирования траектория (БС) условно разложена на элементарные участки, имеющие радиальную и окружную составляющие. Элементарные окружные участки вдоль кривой (БС) представляют собой общее отклонение точки (В) от соответствующей точки реальной траектории (С) при прекращении действия поворотного ускорения. Совершенно очевидно, что сумма элементарных окружных участков вдоль реальной траектории движения (БС) не равна длине дуги (ВС).

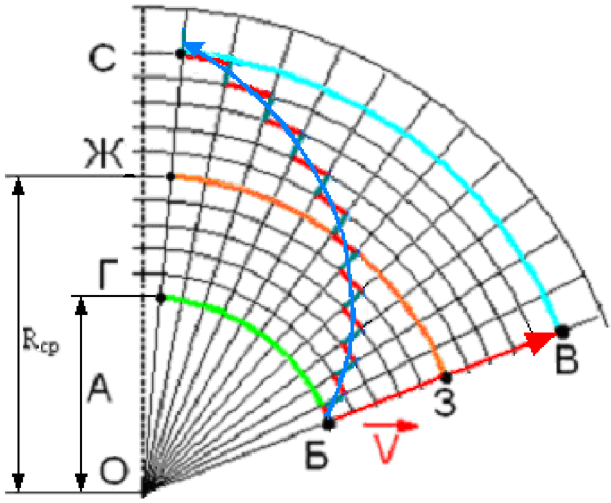


Рис. 3.5

Дуга (ВС) содержит участки, которые **не эквивалентны** элементам реальной траектории общего поворотного движения, т.е. общего отклонения реальной траектории от траектории радиального движения в отсутствие поворотного ускорения. В некотором приближении только один участок дуги (ВС) в конце рассматриваемого интервала времени сопоставим с соответствующей частью общего отклонения поворотного движения, т.к. радиус дуги (ВС) наиболее близок к радиусу поворота в последнем секторе криволинейной траектории. Все остальные участки дуги (ВС) никогда и ни при каких обстоятельствах не могут быть пройдены телом в ходе общего поворотного движения и, следовательно, не могут соответствовать элементам реальной траектории, в том числе и общего поворотного движения в любом сколь угодно малом интервале времени. Поэтому девиация, определённая через дугу (ВС) после учёта пути переносного вращения, пройденного с начальной линейной скоростью переносного вращения, не может соответствовать элементам реальной траектории поворотного движения.

В классической физике девиация поворотного движения определяется с учётом максимального радиуса поворота на каждом элементарном участке траектории. Фактически же максимального радиуса поворотного движения тело достигнет только к конечному моменту рассматриваемого интервала времени, в то время как всё остальное время радиус непрерывно изменяется. Следовательно, ни одно мгновенное значение радиуса поворотного движения в отдельности не может быть использовано для расчёта девиации поворотного движения. Для правильного определения девиации поворотного движения необходимо учитывать каждое мгновенное значение радиуса поворота. Поэтому девиация поворотного движения эквивалентна дуге окружности со средним радиусом поворота на каждом участке траектории, на котором она определяется.

Реальная девиация равномерного поворотного движения вдоль траектории (БС), которая не зависит от изменения радиуса поворота в рассматриваемом интервале времени, равна длине дуги (ЖЗ) соответствующей среднему радиусу поворота (Rср) в этом интервале времени за вычетом дуги (БГ), соответствующей приращению поворотного движения за счёт начальной линейной скорости переносного вращения в точке (Б). Действительно, элементарные дуги вдоль реальной траектории (БС) с радиусами большими среднего радиуса (Rср) больше соответствующих им участков средней дуги (ЖЗ), в то время как элементарные дуги с меньшими радиусами, меньше соответствующих участков дуги (ЖЗ). Однако в силу прямой пропорциональности величины радиуса и длины окружности общая сумма окружных участков вдоль кривой (БС) равна длине дуги (ЖЗ). Радиальные участки, пройденные с постоянной радиальной скоростью (Vр) не влияют на величину общего приращения поворотного движения, т.к. проекции радиальных участков на любую из элементарных дуг ***равны нулю***.

Математическая операция дифференцирования предполагает, что переменная физическая величина в минимальном интервале времени дифференцирования является величиной постоянной равной среднему значению изменяющейся физической величины в этом интервале времени. В отношении поворотного движения, точнее, в отношении радиуса поворотного движения этот математический [принцип дифференцирования](#) в классической физике почему-то не соблюдается. Дифференцированием поворотного движения в классической физике определяется только среднее значение поворотного ускорения, но не учитывается изменение радиуса поворотного движения, определяющего реальную девиацию, т.е. приращение поворотного движения в каждом минимальном интервале времени. Вместо среднего значения радиуса поворотного движения в классической физике за радиус поворотного движения принимается максимальный радиус поворотного движения. Однако, если приращение поворотного движения, в том числе и равномерного, определено с учётом какого-либо другого значения радиуса кроме среднего, т.е. определено неверно, то никаким дифференцированием невозможно достичь истинного значения поворотного ускорения в рассматриваемом интервале времени.

С учётом изложенного определим линейное ускорение, которое эквивалентно ускорению Кориолиса (*а*к) через девиацию поворотного движения. При этом, поскольку в рассматриваемом случае дуга (ЖЗ), кроме девиации поворотного движения включает в себя отрезок, пройденный с начальной линейной скоростью (Vлб), применим формулу равноускоренного движения для пути (S) с учетом начальной скорости, являющейся постоянной составляющей равноускоренного движения.

$S = V_{лб} \cdot t + a_к \cdot t^2/2$ (3.1)

Где Vлб – линейная скорость точки (Б)

Тот же самый путь можно определить как суммарную длину элементарных участков поворотного движения вдоль траектории (БС), из которых и складывается в конечном итоге девиация поворотного движения с учетом постоянной начальной линейной скорости, равная дуге (ЖЗ).

Радиус дуги (ЗЖ) равен среднему радиусу между начальным и конечным радиусом поворотного движения. Обозначим его (Rср):

$R_{ср} = (OC+A) / 2$ (3.2)

Очевидно, что:

$OC = A + V_р \cdot t$ (3.3)

Подставляя (1.13) в (1.12) получим:

$R_{ср} = A + V_р \cdot t/2$ (3.4)

Путь (S), выраженный через угловую скорость (ω), определится выражением:

$S = R_{ср} \cdot \omega \cdot t$ (3.5)

Подставляя (3.4) в (3.5) и приравняв (3.1) и (3.5) получим:

$V_{лб} \cdot t + a_к \cdot t^2/2 = (A + V_р \cdot t/2) \cdot \omega \cdot t$

или

$2 \cdot V_{лб} \cdot t + a_к \cdot t^2 = 2 \cdot A \cdot \omega \cdot t + V_р \cdot \omega \cdot t^2$

или

$2 \cdot V_{лб}/t + a_к = 2 \cdot A \cdot \omega/t + V_р \cdot \omega$ (3.6)

Отсюда находим ускорение Кориолиса (*а*к):

$\boldsymbol{a_к = 2 \cdot A \cdot \omega/t + V_р \cdot \omega - 2 \cdot V_{лб}/t}$ (3.7)

Заметим, что произведение **A*ω** есть не что иное, как **(Vлб).** Произведя замену, получим выражение (3.8), в котором отсутствует начальная линейная скорость, т.е. ускорение Кориолиса зависит только от угловой скорости переносного вращения и линейной скорости относительного движения**:**

$\underline{\boldsymbol{a_к = \omega \cdot V_р}}$ (3.8)

Выражение (3.8), полученное с учётом реального изменения радиуса поворотного движения отличается от формулы для (***а*к**), приведенной в справочнике по физике для высшей школы (3.9):

$a_к = 2 \cdot A \cdot \omega/t + 2 \cdot V_р \cdot \omega$ (3.9)

Авторы не учли, что:

во-первых: радиус движения тела по окружности – **переменный**, т.е. реальный путь, пройденный телом за счет ускорения Кориолиса ровно вдвое меньше длины дуги (ВС) за вычетом дуги (БГ), равной длине пути, пройденного с начальной линейной скоростью (Vлб);

во-вторых: начальная скорость тела в точке (Б) $\mathbf{V_{лб} \neq 0}$**.** Поэтому путь (S), пройденный телом под действием ускорения Кориолиса равен не:

$S = a_к \cdot t^2/2$, (3.10)

как записано в справочнике, а с учетом начальной линейной скорости переносного вращения (Vлб):

$S = V_{лб} \cdot t + a_к \cdot t^2/2$ (3.11)

Независимость ускорения Кориолиса от начальной линейной скорости переносного вращения, а, следовательно, и от начального радиуса переносного вращения в начале минимального интервала времени дифференцирования вполне закономерна, т.к. начальная скорость в интервале времени дифференцирования есть величина постоянная. Поэтому приращение поворотного движения в каждом минимальном интервале времени следует определять, как приращение поворотного движения, начинающегося с нулевого радиуса поворота в начале любого рассматриваемого интервала времени, т.е. начальный радиус переносного вращения при определении девиации поворотного движения не учитывается. Выше для более наглядного представления структуры общего поворотного движения и места занимаемого девиацией поворотного движения в общем поворотном отклонении, девиация поворотного движения рассматривалась в составе общего отклонения поворотного движения. На Рис. 3.6 графически пояснено определение девиации поворотного движения с нулевого радиуса поворота без учёта начальной линейной скорости переносного вращения.

В соответствии с положениями теоретической механики движение по любой криволинейной траектории может быть достигнуто одним поступательным и одним вращательным движением (см. Рис. 3.6). Таким образом, общий путь сложного движения раскладывается на три составляющие: на путь переносного движения (О-О1), путь относительного движения (О1-С) и на поворотный путь (ВС). В соответствии с классической схемой криволинейного движения поступательное движение по траектории переносного движения (О-О1) и вращательное движение в точке переносной траектории, соответствующей конечному моменту рассматриваемого интервала времени в точке (О1) осуществляются с учётом завершённого в рассматриваемом интервале времени относительного движения (ОА). При этом поворотный путь (ВС) принимается за девиацию поворотного движения. Таким образом, поворотное движение в классической физике осуществляется с максимальным радиусом поворота в течение всего рассматриваемого интервала времени, в то время как реально поворотное движение, начинающееся с нулевого радиуса поворота, достигает максимального радиуса поворота только к концу рассматриваемого интервала времени.

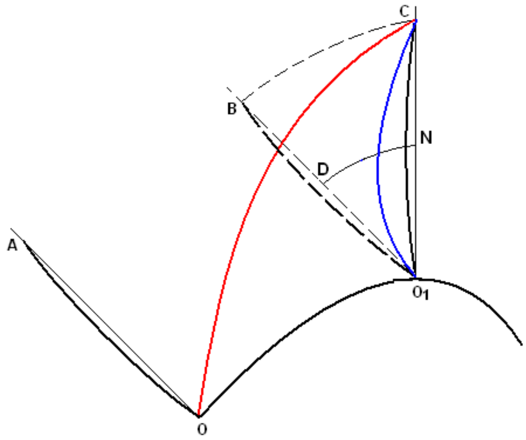


Рис. 3.6

Таким образом, классическая схема сложного движения не отражает действительности. Такую схему можно применять только для сложного движения, в котором отсутствует переносное вращение. При наличии переносного вращения движение вдоль относительной траектории следует рассматривать одновременно с поворотом относительной траектории в конечной точке траектории переносного движения (О1), соответствующей конечному моменту рассматриваемого интервала времени. Поступательное движение в этом случае осуществляется как перемещение точки начала относительного и поворотного движений в конечную точку траектории переносного движения, начиная с которой одновременно осуществляются относительное и поворотное движения. При этом реальная траектория с учётом поворотного движения соответствует кривой (О1-С), которая обозначена на рисунке 3.6. синим цветом.

В предложенной академической схеме представления сложного движения классический принцип разложения абсолютной траектории на составляющие, соответствующие каждому виду движения полностью сохраняется, но при этом учитывается реальный путь, пройденный с ускорением Кориолиса, т.к. реальное поворотное движение осуществляется с изменяющимся радиусом поворота. Как мы отмечали выше, поворотное движение с изменяющимся радиусом поворота состоит из окружных и радиальных участков. Элементарные окружные участки реальной поворотной траектории и составляют реальную девиацию поворотного движения, равную длине дуги (DN) (Рис. 3.6).

Таким образом, с учётом правильно определённой девиации поворотного движения одним из главных критериев корректности определения, которой является соответствие девиации реальным элементам траектории поворотного движения, следует, что полное ускорение Кориолиса соответствует линейному ускорению в направлении линейной скорости переносного вращения. При этом приращение скорости абсолютного движения в направлении линейной скорости переносного вращения происходит за счёт изменения направления радиальной скорости относительного движения, т.е. ускорение в направлении линейной скорости переносного вращения одновременно является ускорением по изменению направления относительной скорости. Это полностью соответствует приведённому выше механизму формирования ускорения Кориолиса и физическому смыслу ускорения Кориолиса.

Поскольку, как было показано выше, ускорение по изменению направления радиальной скорости и ускорение по приращению абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного движения представляют собой одну и ту же физическую величину, то ускорение Кориолиса можно определить через прирост линейной скорости переносного вращения. Пусть тело (Б) движется (см. рис.3.5) вдоль радиуса в направлении точки (В) с постоянной радиальной скоростью (Vр). За время (t) - время прохождения пути (БС) линейная скорость движения по окружности увеличится от линейной скорости точки (Б) – (Vлб) до линейной скорости точки (С) – (Vлс). Разгон происходит под воздействием направляющей (ОВ) на тело (Б) с силой Кориолиса (Fк) и ускорением Кориолиса (***а*к**). Ускорение определяется как прирост линейной скорости за единицу времени (t):

$a\text{к} = (V_{лс} - V_{лб})/t$ (3.12)

Если выразить линейные скорости через угловую скорость получим:

$a\text{к} = (\omega^*(A + Vр^*t) – \omega^*A)/t$ (3.13)

или:

$\boldsymbol{\underline{a\text{к} = \omega^*Vр}}$ (3.14)

В случае изменения направления движения тела (Б) на противоположное, т.е. к центру вращения выражение для (Rср) приобретет вид:

$R_{ср} = A – V^*t/2$ (3.15)

$S = V_{лб}^*t - a\text{к} ^*t^2/2$ (3.16)

Тогда получим для (***а*к**):

$\mathbf{- a\text{к} = 2^*V_{лб}/t - 2^*A^*\omega/t + V^*\omega}$ (3.17)

или

$\mathbf{- \underline{a\text{к} = \omega^*V}}$ (3.18)

В некоторых случаях радиальное относительное движение может осуществляться с ускорением. Это необходимо учитывать при определении ускорения Кориолиса. Рассмотрим случай равноускоренного радиального движения. Вернемся еще раз к формуле (3.12):

$a\text{к} = (V_{лс} - V_{лб})/t$ (3.12)

Запишем выражение для линейной (окружной) скорости в точке (Б):

$V_{лб} = \omega * A$ (3.19)

И для линейной (окружной)скорости точки (С):

$V_{лс} = \omega * (A + V_р * t)$ (3.20)

Здесь (Vр) – радиальная скорость с учетом радиального ускорения.

Скорость (Vр) можно найти через радиальное ускорение. Так как ускорение в общем случае может меняться, найдем среднюю величину радиального ускорения (*а*р) на участке (БС):

$a\text{р} = (a\text{рс} + a\text{рб})/2$ (3.21)

Тогда радиальная скорость с учетом радиального ускорения определится выражением:

$Vр = Vр_н + (a\text{рс} + a\text{рб})^*t/2$ (3.22)

где: $Vр_н$ - радиальная скорость начальная.

Подставим (3.22) в (3.20):

$V_{лс} = \omega *(A+(Vр_н+(a\text{рс} + a\text{рб})^*t/2)^* t)= \omega^*A+\omega^*t^*Vр_н+\omega^* a\text{рс}^*$
$^* t^2/2+\omega * a\text{рб}^*t^2/2$
(3.23)

Подставим (3.23) и (3.19) в (3.12):

$a\text{к}=\omega^*A/t+\omega^*Vр_н+\omega^* a\text{рс}^*t/2+\omega^* a\text{рб}^*t/2-\omega^*A/t$

или :

$\boldsymbol{\underline{a\text{к} = \omega^*Vр_н + \omega^*t^*(a\text{рс} + a\text{рб})/2}}$ (3.24)

Получили формулу для ускорения Кориолиса при ускоренном радиальном движении.

Физический смысл ускорения Кориолиса заключается в том, что при движении вдоль радиуса в сторону его увеличения происходит **разгон** материального тела до большей линейной скорости, соответствующей новому радиусу вращения. При движении к центру вращения происходит **торможение** тела до меньшей линейной скорости, соответствующей меньшему радиусу переносного вращения. При этом за счёт той же силы Кориолиса, которая разгоняет или тормозит тело в направлении линейной скорости переносного вращения, одновременно и с тем же самым ускорением происходит и изменение направления радиальной скорости относительного движения.

3.2. ВТОРОЙ ВАРИАНТ ПРОЯВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА. ТЕЛО ДВИЖЕТСЯ ВДОЛЬ ОКРУЖНОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО РАДИУСУ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ .

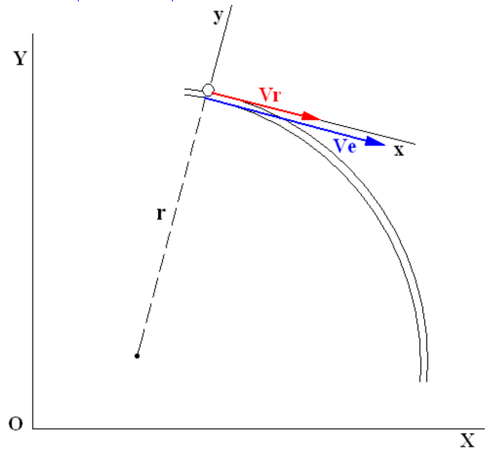


Рис. 3.7

Второй вариант (см. Рис.3.7) описан, например, в упомянутой выше работе Матвеева А. Н. «Механик8 и теория относительности» 3-е издание, Москва, «ОНИКС 21 век», «Мир и образование», 2003 г. Приведем формулу (66.6) Матвеева для абсолютного ускорения (*w*) при равномерном движении точки перпендикулярно радиусу вращения:

$$w = (\omega + \omega')^2 * r = \omega^2 r + \omega'^2 * r + 2*\omega*\omega' * r, \qquad (66.6)$$

где:

$(\omega + \omega')$ – угловая скорость вращения точки в неподвижной системе координат;

ω – угловая скорость вращающейся системы координат (угловая скорость переносного движения);

$\omega' * r = V'$ – относительная скорость;

ω' – относительная угловая скорость;

На рисунке 3.8 графически изображена траектория сложного движения, в котором тело движется перпендикулярно радиусу вращающейся системы в абсолютной системе координат, которое можно представить как вращательное движение тела с линейной абсолютной скоростью (Va) и суммарной ($\omega+\omega'$) угловой скоростью. В составе абсолютной скорости первый член выражения (66.6) - (ω^2r) определяет непосредственно переносное ускорение, второй член (ω'^2*r) определяет относительное ускорение, а третий член (2*ω*ω'*r) выражения (66.6) с классической точки зрения представляет собой ускорение Кориолиса.

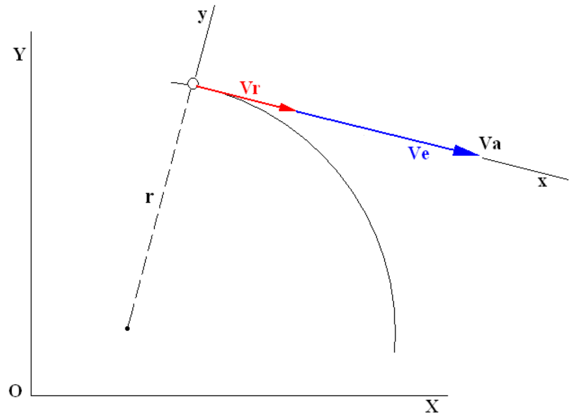


Рис. 3.8

Третий член выражения (66.6) можно представить в следующем виде:

$w_к = 2*\omega*\omega'*r = (\omega*r)*\omega' + \omega*(\omega'*r) = \mathbf{Ve}*\omega' + \mathbf{Vr}*\omega$,

где:

Vr*ω - дополнительное поворотное ускорение, связанное с приростом относительной скорости (Vr) в составе абсолютной скорости (Va);

Ve*ω' - дополнительное поворотное ускорение, связанное с приростом линейной скорости переносного вращения (Ve) в составе абсолютной скорости (Va);

Физическую сущность ***дополнительного ускорения*** (2*ω*ω'*r) проявляющегося при движении тела перпендикулярно радиусу вращающейся системы можно пояснить следующим образом.

Подвижная система отсчета (хоу), в которой тело движется с относительной скоростью (Vr) получает дополнительную угловую скорость (ω) за счёт переносного вращения. Следовательно, в абсолютной системе координат (XOY) наряду с непосредственно относительным ускорением равным ($Vr*\omega^{/}$) тело испытывает дополнительное ускорение направления (Vr*ω), связанное с изменением направления вектора относительной скорости (Vr), вращающегося с дополнительной угловой скоростью переносного вращения.

Вектор абсолютной скорости (Va) вращается с суммарной угловой скоростью **($w+w^{/}$).** Следовательно, в абсолютной системе координат (XOY) вектор линейной скорости переносного вращения (Ve) совершает дополнительное вращение с угловой скоростью относительного вращения ($\omega^{/}$). Следовательно, наряду с непосредственно переносным ускорением (Ve*ω) вектор линейной скорости переносного вращения (Ve) в составе абсолютной скорости (Va) получает дополнительное поворотное ускорение ($Ve*\omega^{/}$).

Таким образом, ***дополнительное ускорение***, проявляющееся при относительном движении тела в направлении перпендикулярном радиусу вращающейся системы по сравнению с суммой переносного и относительного ускорений с физической точки зрения действительно равно удвоенному произведению переносной угловой скорости на относительную угловую скорость и на радиус переносного вращения. Однако выражения ($Ve*\omega^{/}$) и (Vr*ω) определяют ускорения разных реальных частей абсолютной линейной скорости. Каждая из скоростей (Ve) и (Vr) в составе абсолютной скорости получает самостоятельное дополнительное вращение с разными угловыми скоростями ($\omega^{/}$) и (ω). При этом количественное равенство двух составляющих ***дополнительного ускорения*** легко объяснимо и непосредственно вытекает из прямо пропорционального соотношения угловых и линейных скоростей вращательного движения.

$\omega/\omega^{/} = Ve/Vr$

откуда следует, что:

$Ve*\omega^{/} = Vr*\omega$

Каждая из составляющих ***дополнительного ускорения*** при движении тела перпендикулярно радиусу ($Ve*\omega^{/}$) и (Vr*ω) учитывает приращение векторов скоростей (Ve) и (Vr), вращающихся с угловыми скоростями, дополняющими собственные угловые скорости этих векторов до суммарной угловой скорости вращения вектора абсолютной скорости (Va). Хотя приращения векторов скоростей (Ve) и (Vr) равны по величине и имеют одинаковое направление, каждое из этих приращений имеет индивидуальный физический эквивалент, соответствующий дополнительному вращению разных частей абсолютной скорости.

Ускорения ($Ve*\omega^{/}$) и (Vr*ω) совпадают по направлению как в классической модели вращательного движения, в которой направление центростремительного ускорения является виртуальным (условным), так и с учётом реальных направлений ускорений вращательного движения, совпадающих с направлением векторов соответствующих линейных скоростей. Приращения скоростей (Ve) и (Vr) за счёт ***дополнительного ускорения*** одинаково определены в любой модели вращательного движения. Поэтому их можно складывать алгебраически в любой модели вращательного движения, не вступая ни в какие противоречия с классической физикой в отличие от сложения составляющих классического ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении, каждая из которых является физическим эквивалентом одного и того же ускорения. При радиальном относительном движении реальную физическую величину ускорения по приращению абсолютной скорости в направлении вектора переносного вращения складывают с её же физическим эквивалентом, - ускорением по изменению направления относительной скорости.

Матвеев утверждает, что ***дополнительное ускорение*** ($2*\omega*\omega^{/}*r$) при относительном движении, перпендикулярном радиусу является ускорением Кориолиса. Однако это далеко не бесспорно, т.к. физический смысл ***дополнительного ускорения*** ($2*\omega*\omega^{/}*r$) противоречит физическому смыслу ускорения Кориолиса, проявляющегося при радиальном относительном движении. Между ускорением Кориолиса при радиальном относительном движении и ***дополнительным ускорением*** при относительном движении, перпендикулярном радиусу есть существенные различия, связанные с физическим механизмом реализации этих ускорений. В каждом из этих случаев изменяется энергетическое состояние движения тела по окружности. Но при радиальном относительном движении ускорение Кориолиса проявляется в **процессе изменения** параметров переносного вращения, а при относительном движении, перпендикулярном радиусу ускорение Кориолиса отмечается в составе ускорения **установившегося** вращательного движения.

При радиальном относительном движении в процессе изменения параметров переносного вращения за счёт ускорения Кориолиса осуществляется привязка радиального относительного движения к параметрам переносного вращения, т.е. привязка изменения абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного вращения к изменению радиальной скорости по направлению и наоборот. Ускорение Кориолиса проявляется только при наличии радиального относительного движения. С прекращением радиального движения прекращается и изменение параметров переносного вращения. При этом поворотное ускорение Кориолиса обращается в нуль. Однако достигнутое на этот момент энергетическое состояние переносного вращения тела сохраняется. При относительном же движении, перпендикулярном радиусу прекращение относительного движения приводит к возврату движения тела по окружности в исходное состояние, т.е. к первоначальному переносному вращению.

Возврат к переносному вращению при прекращении относительного движения, перпендикулярного радиусу можно представить как сложное движение, в котором относительная линейная скорость направлена противоположно линейной скорости переносного вращения с абсолютной скоростью, т.е. необходимо изменение направления относительного движения. При этом соответствии с классической моделью поворотного движения переносным ускорением следует считать абсолютное ускорение, которое было достигнуто до смены направления относительного движения. То есть абсолютное ускорение в составе, которого якобы действует и ускорение Кориолиса, только в соответствии с изменившимися начальными установками еще до начала относительного движения превращается в переносное ускорение, в котором поворотное ускорение отсутствует.

В составе же переносного ускорения, которое было таковым до смены направления относительной скорости, наоборот следует выделить ускорение Кориолиса, т.к. бывшее переносное ускорение превращается в абсолютное ускорение. Причем, несмотря на смену направления линейной скорости относительного движения ускорение Кориолиса в обоих случаях направлено в одну и ту же сторону, т.к. центростремительное ускорение, всегда направлено к центру вращения. Таким образом, классическая модель поворотного движения содержит множество противоречий:

Во-первых, поскольку абсолютное ускорение с прекращением относительного движения уменьшается, то ускорение Кориолиса должно быть направлено в сторону противоположную переносному ускорению, а не в одну сторону с ним. Это противоречие напрямую связано с противоречием вращательного движения, в котором направление центростремительного ускорения не совпадает с реальным направлением результирующего движения. С учетом направления угловых скоростей никаких противоречий при сложении разнонаправленных вращательных движений не возникает, зато противоречие вращательного движения, связанное с направлением классического центростремительного ускорения при сложении ускорений разнонаправленных вращательных движений проявляется в полной мере.

Во-вторых, в соответствии с классической моделью поворотного движения силой Кориолиса приходится считать часть центробежной силы, которая направлена в противоположную сторону по отношению к вызываемому ей ускорению, поскольку во вращательном движении с классической точки зрения проявляется только центробежная сила. Это противоречие, также как и предыдущее, переходит в классическую модель поворотного движения из классической модели вращательного движения и относится как к сложному движению с радиальным относительным движением, так и к сложному движению с перпендикулярным к радиусу относительным движением. Как и во вращательном движении, в котором центробежная сила и центростремительное ускорение имеют противоположные направления, так и в поворотном движении сила и ускорение Кориолиса имеют разное направление.

В-третьих, поскольку с прекращением относительного движения, перпендикулярного радиусу параметры движения тела по окружности возвращаются в исходное состояние, то ***дополнительное ускорение*** ($2*\omega*\omega^{/}*r$) не является ускорением Кориолиса, т.к. поворотное ускорение по своему физическому смыслу только **сопутствует** изменению параметров вращательного движения, но не изменяет их непосредственно. Параметры вращательного движения при относительном движении перпендикулярном радиусу устанавливаются и поддерживаются непосредственно за счёт самого ускорения вращательного движения. Только изменение центростремительного ускорения установившегося вращательного движения приводит к изменению параметров вращательного движения. Аналогично разница переносных ускорений при радиальном относительном движении для разных значений текущего радиуса переносного движения также не является ускорением Кориолиса, в том числе и с позиции классической физики и численно не равна поворотному ускорению Кориолиса.

Дополнительное ускорение ($2*\omega*\omega^{/}*r$) является физической величиной, определяющей разницу энергетических уровней установившегося абсолютного вращательного движения и суммы переносного и относительного вращательных движений. Как было показано выше ускорение вращательного движения это обобщённая условная величина, которая косвенно характеризует энергию автоколебательного процесса вращательного движения, а не геометрическое перемещение под действием центростремительного ускорения. При переходе же от одного энергетического уровня вращательного движения к другому ускорение перехода характеризуется третьей производной приращения движения, которая по абсолютной величине всегда больше ускорения, характеризующего разницу энергетических уровней. Ускорение ($2*\omega*\omega^{/}*r$) это различие энергетических уровней вращательных движений со статическими установившимися параметрами. В динамике же необходимо учитывать еще и время перехода между уровнями.

В-четвёртых, в классической модели поворотного движения при относительном движении, перпендикулярном радиусу одно и то же переносное ускорение при смене направления линейной скорости относительного движения является как переносным ускорением, в котором ускорение Кориолиса отсутствует, так и абсолютным ускорением, в составе которого якобы проявляется и поворотное ускорение. В каждой (n)-ой вращающейся системе осуществляется переносное движение по отношению к (n+1)-ой системе. Однако по отношению к системе (n-1) часть переносного ускорения, которое проявляется на уровне (n) с классической точки зрения превращается в ускорение Кориолиса, а само переносное ускорение превращается в абсолютное ускорение, что необоснованно с физической точки зрения. Физический смысл ускорения не может зависеть от исходных установок в соответствии, с которыми оно рассматривается, и которые не определяют физический механизм ускорения.

Академически любое равномерное вращательное движение можно разложить на бесконечное множество вращательных движений с разными угловыми скоростями и с разными энергетическими уровнями, сумма которых с учётом разницы ускорений различных уровней эквивалентна исходному вращательному движению. Однако это не значит, что исходное вращательное движение состоит из бесконечного множества ускорений Кориолиса, переносных ускорений и ***дополнительных ускорений,*** которые дополняют энергетические уровни одних вращательных движений до энергетических уровней других вращательных движений. Вид движения в каждой вращающейся системе, в которой осуществляется равномерное движение по окружности один и тот же. ***Дополнительное ускорение***, проявляющееся при относительном движении, перпендикулярном радиусу ни по физическому смыслу, ни по механизму осуществления движения, к которому оно принадлежит, не соответствует понятию поворотного ускорения.

Для поддержания установившегося равномерного вращательного движения с суммарной угловой скоростью при относительном движении, перпендикулярном радиусу никакого дополнительного ускорения не требуется. Равномерное вращательное движение является саморегулирующимся автоколебательным физическим процессом с фиксированным энергетическим уровнем. При полном отсутствии трения, в том числе и во внутренних структурах вещества, после достижения заданной линейной скорости за счёт относительного движения абсолютное вращательное движение будет сохраняться сколь угодно долго без каких-либо дополнительных по отношению к вращательному движению сил. Для того чтобы прекратить действие так называемого ускорения Кориолиса в этом случае необходимо не просто прекратить относительное движение, а изменить его направление, о чём мы говорили выше. Таким образом, существование ускорения Кориолиса в составе ускорения абсолютного вращательного движения, как какого-то дополнительного ускорения помимо ускорения установившегося равномерного движения по окружности с суммарной угловой скоростью при относительном движении, перпендикулярном радиусу не обусловлено энергетически.

Дополнительная сила в равномерном вращательном движении необходима только при изменении параметров вращения. В процессе изменения параметров переносного вращения при радиальном относительном движении проявляется сопутствующее поворотное ускорение. Однако изменение энергетического уровня вращательного движения на новом радиусе переносного вращения осуществляется не за счёт поворотного ускорения. Переходное ускорение по изменению параметров самого вращательного движения не является ускорением Кориолиса. То же самое можно сказать и в отношении изменения энергетического уровня вращательного движения при относительном движении, перпендикулярном радиусу с той лишь разницей, что изменяется не радиус, а угловая скорость вращения. В установившемся же абсолютном вращательном движении поворотное ускорение отсутствует, т.к. в этом случае проявляется только ускорение вращательного движения, которое условно характеризует вращательное движение с энергетической точки зрения, а не геометрически.

Дополнительное ускорение установившегося абсолютного вращательного движения по отношению к сумме ускорений переносного и относительного движений является органической составной частью центростремительного ускорения, которое характеризует единый вид движения, а не сложное движение, состоящее из разных видов движения. Любая точка вращающегося диска с классической точки зрения движется с **переносным** ускорением независимо от радиуса, на котором она находится, хотя фактически каждая из них принадлежит к движению по окружности со своими индивидуальными параметрами. Как только движущееся радиально по вращающемуся диску тело достигает новой его точки на радиусе, оно автоматически приобретает переносное ускорение этой точки. С таким же основанием можно утверждать, что при перпендикулярном радиусу относительном движении, после установления абсолютной угловой скорости тело с физической точки зрения приобретает переносное или абсолютное ускорение движения по окружности с абсолютной угловой скоростью.

При движении вдоль оси вращающейся системы ускорение Кориолиса, как известно, не проявляется, поскольку соседние точки траектории имеют одинаковую скорость. При относительном движении, перпендикулярном радиусу вектор скорости в соседних точках траектории изменяется только по направлению. Но изменение направления происходит в соответствии с механизмом и в рамках вращательного движения, т.е. в этом случае, по нашему мнению, ускорение Кориолиса также не проявляется. Поворотное ускорение Кориолиса проявляется только при радиальном относительном движении. Причём поворотное ускорение, хотя и имеет общие элементы с вращательным движением, но строго говоря вращательным движением не является.

При радиальном относительном движении изменение направления вектора относительной скорости не является частью центростремительного ускорения вращательного движения вектора радиальной скорости, т.к. вращательного движения вектора радиальной скорости как такового не существует. Изменение направления вектора радиальной скорости осуществляется в разрозненных элементарных циклах вращательного движения в каждой конкретной точке на радиусе переносного движения, которые разделены между собой достаточно длительными участками движения по инерции. Отдельный цикл изменения направления линейной скорости движения вне автоколебательного процесса вращательного движения представляет собой лишь элементарное отражение линейного движения от отражающей поверхности.

Вращательное движение при относительном движении, перпендикулярном радиусу эквивалентно переносному движению с изменяющейся угловой скоростью. В процессе достижения системой угловой скорости абсолютного вращательного движения тело испытывает угловое ускорение, которое не равно ***дополнительному ускорению*** ($2*\omega*\omega^{/}*r$) и не является ускорением Кориолиса. После установления абсолютного вращательного движения на тело действует только центростремительное ускорение вращательного движения физическая сущность и механизм осуществления, которого не соответствует физической сущности ускорения Кориолиса. При этом ***дополнительное ускорение*** характеризует избыточную энергию абсолютного движения по отношению к переносному движению при наличии энергии относительного движения или избыточную энергию абсолютного движения по отношению к относительному движению при наличии энергии переносного вращения.

Задача определения поворотного движения сформулирована в классической физике таким образом, что сам процесс установления заданного значения относительной скорости в рассматриваемых видах сложного движения не учитывается. Однако при радиальном относительном движении процесс установления радиальной скорости, тем не менее, является частью общего переходного процесса по изменению параметров переносного вращательного движения, который сопровождается поворотным ускорением Кориолиса с учётом ускоренного радиального движения (формула 3.24). При относительном движении, перпендикулярном радиусу ***дополнительное ускорение*** проявляется в **установившемся** вращательном движении практически мгновенно без учёта переходного процесса. В установившемся вращательном движении с физической точки зрения может проявляться только центростремительное ускорение вращательного движения, независимо от того, в какой системе координат оно рассматривается.

Таким образом, при таком количестве различий и практическом отсутствии общих объединяющих проявлений дополнительных ускорений в рассматриваемых вариантах сложного движения, невозможно утверждать, что оба эти ускорения относятся к ускорению Кориолиса. Если считать ускорением Кориолиса поворотное ускорение, проявляющееся в первом варианте относительного движения, то оно по физическому смыслу не соответствует дополнительному ускорению при перпендикулярном к радиусу относительном движении и наоборот. Если же считать ускорением Кориолиса дополнительное ускорение при относительном движении перпендикулярном радиусу, то поворотное ускорение противоречит центростремительному ускорению, как обобщенному, но единому и неделимому ускорению вращательного движения.

Дополнительное ускорение при относительном движении, перпендикулярном радиусу, конечно же, необходимо учитывать в составе абсолютного движения, т.к. оно является неотъемлемой частью абсолютного ускорения и ***непосредственно входит в состав переносного ускорения.*** Однако даже условно академически нельзя назвать ***дополнительное ускорение*** при относительном движении, перпендикулярном радиусу, - ускорением Кориолиса, т.к. в этом случае неизбежны противоречия с физической сущностью ускорения Кориолиса, проявляющего в сложном движении при радиальном относительном движении и с физической сущностью центростремительного ускорения.

3.3. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ПРОЯВЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА.

Рассмотрим общий случай проявления ускорения Кориолиса, в котором относительная скорость имеет произвольное направление. Хотя, по нашему мнению, ***дополнительное ускорение*** во вращательном движении с относительным движением, перпендикулярным радиусу не является ускорением Кориолиса, но, тем не менее, оно влияет на абсолютное ускорение сложного движения, т.к. входит в состав переносного ускорения.

Матвеев считает, что: *«Произвольная скорость может быть выражена в виде суммы слагающих, направленных по радиусу и перпендикулярно к нему, и для обеих составляющих справедлива одна и та же формула вида (66.7). Отсюда следует, что формула (66.7) справедлива для кориолисова ускорения при произвольном направлении относительной скорости».*

$w_K = 2[\omega, v^{/}]$ (66.7)

где $v^{/}$ - относительная скорость перпендикулярная радиусу.

Запишем в геометрическом виде выражение для ускорения Кориолиса при произвольном направлении относительной скорости в классической интерпретации:

$a_К = 2*\omega *Vr_{=} + 2*\omega*Vr_{\perp}$

(3.25)

где:

$2*\omega*Vr_{\perp} = 2*\omega*\omega^{/}*r$;

$Vr_{=}$: радиальная составляющая относительной скорости;

$Vr_{\perp}$: перпендикулярная составляющая относительной скорости;

Ω: мгновенное значение переносной угловой скорости;

$\omega^{/}$: относительная угловая скорость,

r: текущее значение радиуса переносного вращения.

Вынося за скобки общий множитель (2* w) можно записать:

$a_К = 2*\omega*(Vr_{=} + Vr_{\perp})$

Сумма ($Vr_{=}$) и ($Vr_{\perp}$), записанная в круглых скобках есть не что иное, как геометрическое выражение для относительной скорости (Vотн):

$V_{отн} = Vr_{=} + Vr_{\perp}$

Тогда:

$a_К = 2*\omega*V_{отн}$.

То есть теоретически, если бы ускорение Кориолиса при относительном движении, перпендикулярном радиусу действительно существовало бы и если бы составляющие ускорения Кориолиса в зависимости от вида относительного движения описывались бы одним и тем же математическим выражением, то ускорение Кориолиса при произвольном направлении относительного движения геометрически действительно определялось бы выражением (66.7). Однако ***дополнительное ускорение*** при относительном движении, перпендикулярном радиусу, на наш взгляд, не является ускорением Кориолиса, а ускорение Кориолиса при радиальном относительном движении в нашей версии вдвое меньше классического ускорения Кориолиса. Поэтому при произвольном направлении относительного движения общее ускорение Кориолиса, по нашему мнению, описывается выражением для ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении в нашей версии с учётом изменяющей за счёт нормальной составляющей относительного движения угловой скорости переносного вращения.

Ускорение Кориолиса по первому варианту формально зависит только от переносной угловой скорости, т.к. относительная угловая скорость в первом варианте проявления ускорения Кориолиса просто отсутствует (абсолютная угловая скорость не изменяется). Реально угловая скорость при произвольном направлении относительного движения, с которой фактически вращается вектор радиальной составляющей относительного движения, является текущей абсолютной угловой скоростью сложного движения, которая постоянно изменяется.

Вектор радиальной составляющей относительной скорости произвольного направления вращается в абсолютной системе координат с **абсолютной** угловой скоростью, как впрочем, и вектора всех составляющих абсолютной скорости сложного движения. Поэтому при произвольном направлении относительного движения в формуле для ускорения Кориолиса, обусловленного радиальной составляющей относительной скорости ($2*\Omega n*Vr_{=}$) в классическом варианте или ($\Omega n*Vr_{=}$) в нашей интерпретации необходимо учитывать абсолютную угловую скорость (**Ωn**) равную сумме текущих угловых скоростей переносного и относительного движений

$\boldsymbol{\Omega n = \omega ет + \omega rт}$,

Где:

ωет = (Ω(n-1))– переносная угловая скорость равная абсолютной угловой скорости на (n-1) шаге дифференцирования;

ωrт – относительная угловая скорость в текущем интервале времени дифференцирования (n).

В выражении же для ***дополнительного ускорения***, обусловленного перпендикулярной к радиусу составляющей относительного движения необходимо учитывать переносную, но не абсолютную угловую скорость, т.к. относительная угловая скорость, дополняющая переносную угловую скорость до абсолютной угловой скорости, учтена в выражении для относительной линейной скорости ($\boldsymbol{\omega}^{/}$*r=Vr$\perp$).

В отсутствие перпендикулярной к радиусу составляющей относительного движения переносная и абсолютная угловые скорости остаются неизменными. Однако в общем случае при произвольном направлении относительного движения необходимо учитывать текущие значения переносной и абсолютной угловых скоростей, т.к. наряду с изменением радиуса при неизменной линейной скорости относительного движения произвольного направления, изменяются относительная и абсолютная угловые скорости. Таким образом, в формуле (3.25) в составляющие ускорения Кориолиса, связанные с направлением относительного движения, с физической точки зрения должны подставляться разные угловые скорости (Ωn) и (ωет). При этом выражение (3.25) должно иметь вид:

aк = 2*Ωn*Vr$_=$+ 2*ωет*Vr$\perp$ (3.25*)

В выражении (3.25*), математические преобразования по приведению этого выражения к выражению вида (66.7) невозможны, т.к. угловые скорости в каждом члене формулы (3.25*) разные, что еще раз подтверждает несостоятельность классической модели ускорения Кориолиса. С учетом реальной текущей угловой скорости при произвольном направлении относительного движения в формуле (3.25*) вынести за скобки можно только множитель «2», что с нашей точки зрения также далеко не бесспорно. Во-первых, в нашей версии множитель «2» отсутствует; а во-вторых, с нашей точки зрения ***дополнительное ускорение*** при относительном движении перпендикулярном радиусу не является ускорением Кориолиса, т.е. выражение для ***дополнительного ускорения*** вообще не должно присутствовать в формуле (3.25*).

Физическое обоснование множителя «2» в ***дополнительном ускорении*** при нормальном относительном движении в классической физике отсутствует. Множитель «2» в классической физике объясняется только математически вне всякой связи с конкретным физическим смыслом ускорения Кориолиса, как множитель, присутствующий в математической формуле разложения суммы квадратов двух чисел. Однако без чёткого физического обоснования соответствия ***дополнительного ускорения*** при относительном движении, перпендикулярном радиусу ускорению Кориолиса при радиальном относительном движении наличие множителя «2» в формуле для ***дополнительного ускорения*** не может быть поводом для применения такого же множителя и в формуле классического ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении. Одной лишь аналогии здесь недостаточно. Тем более что приведённая выше физическая сущность ***дополнительного ускорения*** при перпендикулярном радиусу относительном движении вообще не соответствует физической сущности ускорения Кориолиса.

Все существующие классические объяснения физической сущности ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении не выдерживают критики. Множитель «2» при радиальном относительном движении скорее противоречит физической сущности явления Кориолиса, чем соответствует ей, как собственно противоречит физической сущности явления Кориолиса и дополнительное ускорение при относительном движении, перпендикулярном радиусу. Поэтому для определения ускорения Кориолиса в общем случае сложного движения при произвольном направлении относительного движения, по нашему мнению, достаточно в формуле для ускорения Кориолиса, обусловленного радиальной составляющей относительного движения в нашей версии учесть изменение текущей угловой скорости, связанное с нормальной составляющей относительного движения:

aк общ. = 2*Ωn*Vr

При этом дополнительное ускорение при относительном движении, перпендикулярном радиусу будет автоматически учтено в составе центростремительного ускорения текущего вращательного движения с текущей абсолютной угловой скоростью (Ωn).

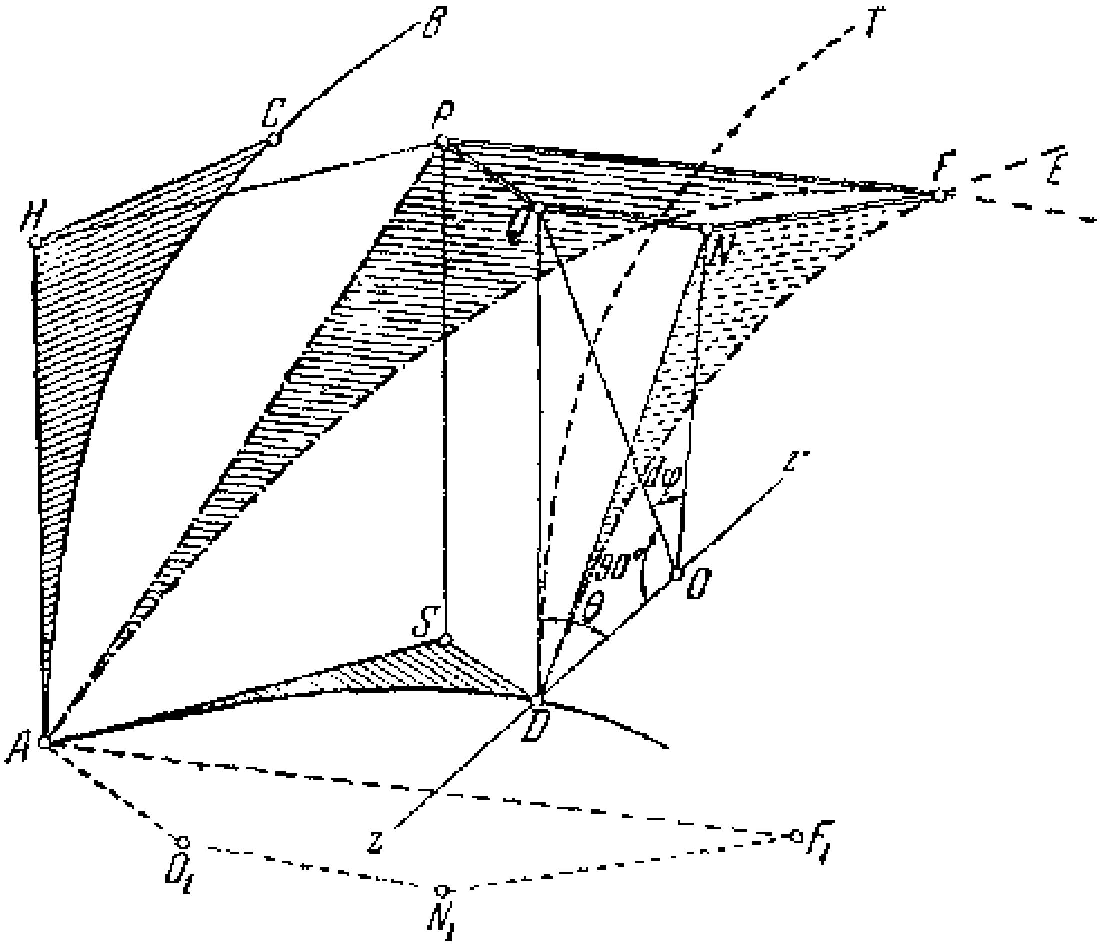
4. КЛАССИКИ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ О ЯВЛЕНИИ КОРИОЛИСА

В классической физике оба варианта проявления ускорения Кориолиса, являются частными случаями общей формулы ускорения Кориолиса, поскольку никто из исследователей явления Кориолиса при радиальном относительном движении не учитывает изменение длины элементарных поворотных участков при изменении радиуса поворотного движения, и смешиваются понятия ускорения Кориолиса и ***дополнительного ускорения*** переносного движения. Любое доказательство теоремы Кориолиса при радиальном направлении относительного движении в классической физике автоматически считается доказательством полной теоремы Кориолиса в общем случае относительного движения в произвольном направлении.

4.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ВЫВОД УСКРЕНИЯ КОРИОЛИСА Н. Е. ЖУКОВСКОГО

Жуковский Н. Е. в работе «Теоретическая механика» издание второе, ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ МОСКВА-ЛЕНИНГРАД 1952 предлагает следующий графический вывод формулы ускорения Кориолиса (см. фотокопии ниже):

Мы ограничимся рассмотрением того случая, когда траектория сама не деформируется, но кроме поступательного движения может иметь еще и вращательное.



Фиг. 46.

Предварительно условимся в некоторых обозначениях. Полное ускорение относительного движения назовем *относительным* ускорением и обозначим через g. Полное ускорение переносного движения назовем *переносным* ускорением и обозначим через l. Наконец, полное ускорение абсолютного движения назовем *абсолютным* ускорением и обозначим через j.

Переходим к решению вопроса. Положим, что траектория движущейся точки в рассматриваемый момент времени занимает положение AB (фиг. 46). Точка, выходя из A, движется по своей траектории, и, если бы траектория была неподвижна, она в бесконечно малый промежуток времени τ перешла бы в положение C.

С другой стороны, если бы точка была в A неподвижна, то через тот же промежуток времени τ она заняла бы положение D вследствие того, что траектория во время τ переместится из положения AB в положение DE. Таким образом, от одновременного движения точки и траектории движущаяся точка опишет некоторую траекторию AF и через промежуток времени τ будет находиться в F, причем $DF = AC$. Построим девиации этих движений. Девиацию относительного движения HC получаем, отложив $AH = u\tau$ по касательной к траектории в точке A, где u есть скорость относительного движения, и соединив H с C. Девиацию переносного движения SD получаем, отложив $AS = w\tau$, где w — скорость переносного движения, и соединив S с D. Построив параллелограмм на AH и AS, утверждаем, что вектор AP направлен по абсолютной скорости и равен $v\tau$, где v — скорость абсолютного движения.

В самом деле, если по направлению AH отложим всю скорость u относительного движения и по направлению AS всю скорость w переносного движения, то, построив на них параллелограмм, получим всю скорость v абсолютного движения, направленную по диагонали AP. Если теперь умножить стороны этого параллелограмма на τ, то стороны его будут $u\tau$ и $w\tau$, а диагональ $v\tau$; но $u\tau = AH$, $w\tau = AS$ согласно построению; следовательно, $v\tau = AP$. Что касается направления AP, то оно есть направление v, т. е. направление абсолютной скорости, так как направление диагонали от пропорционального увеличения или уменьшения сторон параллелограмма не изменяется. Если $AP = v\tau$, то, соединив P с F, получим PF — девиацию абсолютного движения.

Итак:

AB есть положение траектории во время t;

DE есть положение траектории во время $t + \tau$;

AC есть путь в относительном движении за время τ;

AD есть путь в переносном движении за время τ;

AF есть путь в абсолютном движении за время τ;

$AH = u\tau$, где u — скорость относительного движения;

$AS = w\tau$, где w — скорость переносного движения;

$AP = v\tau$, где v — скорость абсолютного движения;

HC — девиация относительного движения, равная $g\frac{\tau^2}{2}$ и параллельная полному ускорению относительного движения;

SD — девиация переносного движения, равная $l\frac{\tau^2}{2}$ и параллельная полному ускорению переносного движения;

PF — девиация абсолютного движения, равная $j\frac{\tau^2}{2}$ и параллельная полному ускорению в абсолютном движении.

Положим, что фигура AHC по прошествии времени τ заняла положение DNF, причем DN не параллельно AH. Проведем из D вектор $DQ \# AH$. Если бы траектория перемещалась поступательно, т. е. параллельно самой себе, то DQ была бы касательной к траектории DT, но так как траектория еще повернулась около оси zz' на некоторый угол, то касательная к ней будет DN. Соединив P с Q,

Q с N и N с F, получим бесконечно малый многоугольник $PQNF$, для которого по правилу сложения векторов можно написать:

$$\overline{PF} = \overline{PQ} + \overline{QN} + \overline{NF}. \tag{54}$$

В этой геометрической сумме нам известны векторы $\overline{PF}$, $\overline{PQ}$ и $\overline{NF}$. Действительно, $\overline{PF}$ есть девиация абсолютного движения и геометрически равна $\frac{1}{2}\bar{J}\tau^2$, т. е.

$$\overline{PF} = \frac{1}{2}\bar{J}\tau^2.$$

Точно так же вектор $\overline{PQ} = \overline{SD}$, но $\overline{SD} = \bar{I}\frac{\tau^2}{2}$, следовательно:

$$\overline{PQ} = \frac{1}{2}\bar{I}\tau^2.$$

Наконец, $\overline{NF} = \overline{HC}$; так как $HC = \frac{1}{2}g\tau^2$, то

$$\overline{NF} = \frac{1}{2}\bar{g}\tau^2,$$

хотя $NF = HC$ только по величине, но в пределе при бесконечно малом τ, когда NF сливается с HC, мы можем принять их направления параллельными, так что равенство $\overline{NF} = \frac{1}{2}\bar{g}\tau^2$ справедливо.

Рассмотрим теперь вектор $\overline{QN}$. Будет доказано в кинематике неизменяемой системы, что всякое перемещение такой системы может быть достигнуто одним поступательным и одним вращательным движениями. Пользуясь этим, мы можем линию AH переместить в положение DN следующим образом: перенести AH поступательно в DQ и повернуть DQ около оси zz' на некоторый угол QON. Тогда QN можно рассматривать, как бесконечно малую дугу, которую описала точка Q в бесконечно малый промежуток времени радиусом OQ из центра O на оси zz', причем треугольник OQN находится в плоскости, перпендикулярной к оси zz', около которой повернулась траектория. Если этот угол назовем через $d\varphi$, то $QN = OQ \cdot d\varphi$; но, как будет сказано в параграфе о вращательном движении, $\frac{d\varphi}{\tau} = \omega$, где ω есть угловая скорость вращения; поэтому $d\varphi = \omega\tau$ и $QN = OQ \cdot \omega\tau$.

Что касается OQ, то ее мы определим из прямоугольного треугольника OQD, в котором прямой угол есть угол при O. Имеем $OQ = DQ \cdot \sin\theta$, где θ — угол между OD (или, что то же, zz') и DQ; но $DQ = AH = u\tau$; поэтому

$$QN = u\omega\tau^2 \sin\theta.$$

Направление вектора $\overline{QN}$ характеризуется тем, что он перпендикулярен одновременно и к DQ и к zz'. К DQ он перпендикулярен как элемент окружности основания конуса, описываемого линией DQ при вращении около zz', к образующей конуса, а к zz' — как линия, лежащая в плоскости вращения, осью которого служит zz'.

Подставляя в уравнение (54) выражения, найденные для векторов $\overline{PF}$, $\overline{PQ}$, $\overline{QN}$ и $\overline{NF}$, находим:

$$\bar{j}\frac{\tau^2}{2}=\bar{g}\frac{\tau^2}{2}+\bar{l}\frac{\tau^2}{2}+\overline{ON},$$

где $QN=u\omega\tau^2\sin\theta$. Разделим полученное геометрическое равенство на общий множитель $\frac{1}{2}\tau^2$. Это значит, что, оставляя направления сторон бесконечно малого многоугольника $PFNQ$ неизменными, мы увеличиваем пропорционально его стороны, т. е. строим подобный многоугольник. Тогда наше уравнение представится в таком виде:

$$\bar{j}=\bar{l}+\bar{k}+\bar{g}. \qquad (55)$$

Полученное уравнение показывает, как выражается полное ускорение сложного движения; вектор $\bar{k}$, равный по величине $2\omega u\sin\theta$, называется *поворотным ускорением.* Уравнение (55) приводит к следующей теореме, принадлежащей Кориолису.

Теорема Кориолиса. *Полное ускорение в сложном движении слагается геометрически из трех векторов:* 1) *из полного ускорения относительного движения,* 2) *из полного ускорения переносного движения и* 3) *из поворотного ускорения.*

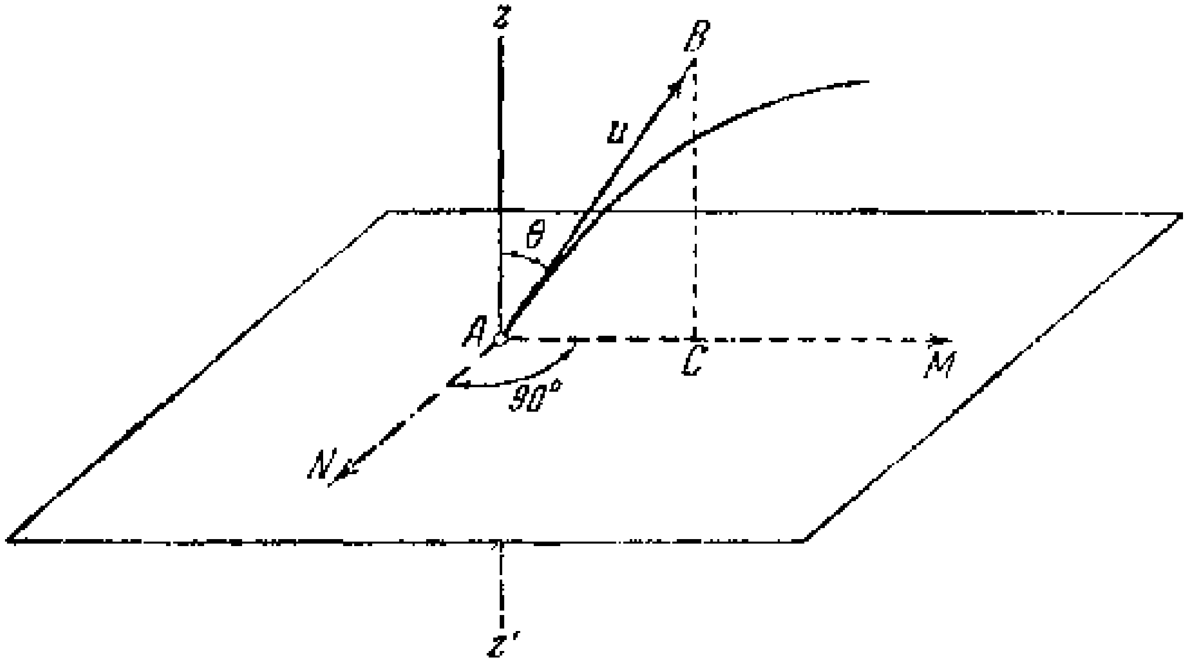
Рассмотрим теперь, как получается вектор, называемый поворотным ускорением. Мы видели, что этот вектор равен по величине

$$k=2\omega u\sin\theta.$$

Траектория относительного движения имеет не только поступательное, но и вращательное переносное движение. Проведем через рассматриваемую точку A (фиг. 47) плоскость, перпендикулярную к оси вращения zz'. Пусть вектор $\overline{AB}$ есть скорость относительного движения u; проектируем ее на эту плоскость. Проекция ее $AC=u\sin\theta$, где θ есть угол скорости u с осью вращения zz'. Умножаем вектор $\overline{AC}$ на 2ω, не изменяя его направления; получаем:

$$AM=2\omega u\sin\theta.$$

Мы видим, что вектор $\overline{AM}$ по величине есть k. Для того же чтобы получить надлежащее направление поворотного ускорения, надо повернуть вектор AM так, чтобы он стал перпендикулярен к оси zz' и к скорости u, т. е. занял положение AN. На основании всего сказанного получится следующее правило: для построения поворотного ускорения надо провести через рассматриваемую точку плоскость перпендикулярно к оси, около которой вращается траектория, спроектировать на эту плоскость относительную скорость u и полученный вектор, не изменяя направления, изменить по величине через умножение на 2ω (т. е. на двойную угловую скорость вращения траектории); потом повернуть его на прямой угол около оси вращения в ту сторону, куда вращается траектория.



Фиг. 47.

Чтобы получить геометрически вектор полного ускорения, нужно при точке A (фиг. 46) построить многоугольник $AO_1N_1F_1$ со сторонами, параллельными многоугольнику $PQNF$, но пропорционально увеличенными в $\frac{2}{\tau^2}$ раз.

Поворотное ускорение обращается в нуль в следующих трех случаях:

1) Когда $\omega = 0$, т. е. когда траектория перемещается поступательно; в этом случае полное ускорение $\bar{j} = \bar{l} + \bar{g}$.

2) Когда $u = 0$; это соответствует тому случаю, когда точка относительного движения не имеет; тогда $\bar{j} = \bar{l}$.

3) Когда $\theta = 0$, т. е. точка движется параллельно оси вращения; в этом случае $\bar{j} = \bar{l} + \bar{g}$.

Относительное движение в работе Жуковского криволинейное. Значит, в рассматриваемом случае присутствует нормальная составляющая относительной скорости. Хотя Жуковский рассматривает наиболее общий случай сложного движения, в котором теоретически присутствует радиальная и нормальная составляющие относительного движения, в его выводе фактически приводится физический механизм определения ускорения Кориолиса только для радиального относительного движения.

В соответствии с академическим понятием о девиации траектория относительного движения в выводе Жуковского раскладывается на девиацию и **условную траекторию** в виде прямой линии, пройденную движущейся точкой за время (τ) с постоянной относительной скоростью (u), которую имела движущаяся точка в относительном движении в начальный момент рассматриваемого интервала времени. При этом приращение поворотного движения определяется как длина дуги (QN), описанной радиусом (OQ=DQ*sinθ=u*τ*sinθ), являющимся радиальной составляющей **условной траектории** относительного движения (DQ) в отсутствии ускорения относительного движения, осуществляющегося со скоростью (u) за время (τ). Проекция условной траектории относительного движения (DQ) **на перпендикулярное** радиусу направление Жуковским **не рассматривается.**

Девиация относительного движения (NF) некоторым образом учитывает нормальную составляющую относительного движения. Однако девиация (NF) геометрически начинается из конечной точки дуги (QN), которая соответствует окончанию поворотного движения в рассматриваемом интервале времени (τ). Следовательно, положение точки (F) и величина девиации относительного движения (NF) никоим образом не могут влиять на длину отрезка (QN), который Жуковский и рассматривает в своём выводе как приращение поворотного движения.

Несмотря на то, что в соответствии с переносным вращением фактически осуществляется поворот всей траектории относительного движения (AC), приращение поворотного движения определяется Жуковским только по повороту проекции **условной траектории** относительного движения на радиальное направление. Проекция условной траектории относительного движения на перпендикулярное радиусу направление и приращение поворотного движения при относительном движении, перпендикулярном радиусу, которое с классической точки зрения также происходит за счёт ускорения Кориолиса, в работе Жуковского не определены ни геометрически, ни физически.

Таким образом, в выводе Жуковского речь идёт исключительно об ускорении Кориолиса, проявляющемся при радиальном относительном движении, несмотря на попытку представить его как вывод ускорения Кориолиса в общем случае сложного движения при произвольном направлении относительного движения. Связь ускорения Кориолиса, проявляющегося при радиальном относительном движении, Жуковским физически не установлена. Поэтому в выводе Жуковского не может считаться доказанным соответствие формулы вида (66.7) общему ускорению Кориолиса при произвольном направлении относительного движения. К тому же, как и во всех предыдущих случаях, рассмотренных выше, вызывает сомнение правильность определения приращения поворотного движения при радиальном относительном движении. Жуковский также как и все другие авторы, занимающиеся изучением явления Кориолиса, при определении девиации поворотного движения не учитывает изменение радиуса элементарного поворота внутри бесконечно малого интервала времени поворотного движения.

Классическая теоретическая механика утверждает, что всякое перемещение неизменяемой системы может быть достигнуто одним поступательным движением и одним вращательным движением. Траектория относительного движения перемещается поступательно вдоль траектории переносного движения до точки соответствующей конечному моменту рассматриваемого интервала времени. Затем траектория относительного движения поворачивается относительного мгновенного центра вращения подвижной системы координат на угол, соответствующий повороту радиуса переносного движения за рассматриваемый интервал времени. Таким образом, легко получить координаты движущейся точки на абсолютной траектории для времени (τ). Однако одних только координат движущейся по абсолютной траектории точки недостаточно для определения абсолютного ускорения. Необходимо учитывать реальную траекторию движения точки, т.е. необходимо знать каким образом, и по какому пути происходило приращение всех составляющих абсолютного движения в рассматриваемом минимальном интервале времени дифференцирования.

В выводе Жуковского в поворотном движении участвует не вектор радиальной составляющей относительной скорости, а проекция (OQ) условной траектории относительного движения (DQ=DN) за время (τ) на радиус переносного вращения. То есть речь идёт не о приращении вектора радиальной скорости, т.е. годографе радиальной скорости, а о приращении поворотного пути, пройденного за счёт поворотного ускорения за время (τ) или о девиации поворотного движения, которая, как мы установили выше, не может быть равна длине дуги (QN). Приращение поворотного движения можно определить и через годограф радиальной составляющей относительной скорости. Однако при этом необходимо помнить, что приращение радиальной скорости - есть полное приращение поворотного движения (см. выше глава 3.1). В упомянотой же выше работе Жуковского речь идёт об определении ускорения Кориолиса именно через девиацию поворотного движения.

Поскольку отрезок (QN) в выражении (54) рассматривается как девиация поворотного движения ($QN_Д$), то его величину необходимо определять с учётом реального поворотного движения, в котором радиус поворота (OQ), связанный с переносным вращением непрерывно изменяется за счёт радиальной составляющей относительного движения, в том числе и внутри минимального интервала времени (τ). Девиация поворотного движения, как мы установили выше, равна дуге окружности, описанной средним радиусом поворотного вращения за рассматриваемый минимальный интервал времени дифференцирования. Только в этом случае выражение (54) Жуковского можно считать правомерным.

Во время реального поворотного движения радиус поворотного движения за время (τ) изменяется от нуля в момент времени (t), когда (τ=0) до максимального значения (OQ) равного (OQ=u*τ*sin θ) в момент времени (t+τ). Поэтому для расчета девиации поворотного движения ($QN_Д$) необходимо учитывать средний радиус поворотного движения (u*τ*sin θ/2) равный половине (OQ) аналогично тому, как мы это делали при определении ускорения Кориолиса через девиацию поворотного движения (см. выше Рис.3.6). Тогда девиация ($QN_Д$) равна:

$QN_Д = (1/2)*(OQ)*\omega*\tau*\sin\theta = (1/2)*(u * \tau)*\omega*\tau*\sin\theta =$

$= (1/2)*u*\omega*\tau^2 *\sin\theta = (\tau^2/2)*u*\omega*\sin\theta$

Девиация криволинейного движения определяется формулой для пути прямолинейного равноускоренного движения:

$S = a*t^2/2$

Заменив ускорение (a) ускорением Кориолиса (k), а время t временем (τ) получим для ($QN_Д$):

$QN_Д = (\tau^2/2) * k$

Приравняв два выражения для ($QN_Д$), найденных через угловую скорость и через ускорение Кориолиса получим:

$(\tau^2/2)*u*\omega*\sin\theta = (\tau^2/2) * k$

Отсюда ускорение Кориолиса равно:

$k = u*\omega*\sin\theta$

Подобный вывод формулы ускорения Кориолиса мы уже приводили выше (см. вывод формулы ускорения Кориолиса (3.8); Рис. 3.5;3.6), где также обращали внимание, что для определения пути, пройденного с ускорением Кориолиса через угловую скорость переносного вращения, необходимо учитывать средний радиус поворота в рассматриваемом интервале времени.

Можно также воспользоваться уравнением (54) первоисточника с учетом найденного нами значения девиации ($QN_Д$). Подставляя девиацию поворотного движения ($QN_Д=\tau^2/2*u*\omega*\sin\theta$) в равенство (54) и разделив все члены равенства на ($\tau^2/2$) получим линейное ускорение, эквивалентное ускорению Кориолиса:

$\mathbf{k = u*\omega*\sin\theta}$

При этом многоугольник PQNF (Фиг.46 по Жуковскому) примет вид PQ_1N_1F (см. Рис.4.1).

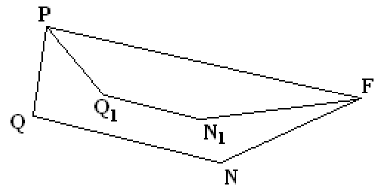


Рис. 4.1

Стороны многоугольника PQNF соотносятся со сторонами многоугольника PQ_1N_1F следующим образом:

$PQ_1 = PQ$

$N_1F = NF$

$Q1N1 = QN_Д = QN/2$

Таким образом, с учетом изменения радиуса поворотной части абсолютного ускорения, значение поворотного ускорения получилось ровно вдвое меньше, чем в выводе формулы ускорения Кориолиса, приведенном Жуковским.

В связи с изменением длины (QN) в нашей интерпретации, изменились и направления девиации относительного и переносного движений. На Рис. 46 первоисточника направление и величина геометрических отрезков девиации не являются строго обоснованными, они показаны схематично, тем более, что Жуковский допускает несовпадение по направлению отрезков (НС) и (NF), которые при минимизации времени (τ) должны сливаться. Возможно, если наша версия ускорения Кориолиса верна, то направление и величина отрезков девиации относительного, переносного и поворотного движений в многоугольнике PQ_1N_1F больше соответствуют действительности, чем направление и величина этих же отрезков в многоугольнике PQNF. Хотя в конечном итоге это не имеет принципиального значения, т.к. направление девиации является условно академическим.

Таким образом, если в выводе Жуковского учесть реальное изменение радиуса поворота в процессе поворотного движения, то мы получим значение абсолютного ускорения сложного движения и поворотного ускорения Кориолиса отличные от их классических значений для первого варианта проявления ускорения Кориолиса. Аналогичные замечания можно предъявить и другим авторам, занимающимся изучением явления Кориолиса. Рассмотрим геометрический вывод ускорения Кориолиса С. М. Тарга.

С. М. Тарг «Краткий курс теоретической механики» МОСКВА ВЫСШАЯ ШКОЛА 1986 (см. фотокопии ниже) доказывает теорему Кориолиса следующим образом.

§ 66. ТЕОРЕМА О СЛОЖЕНИИ УСКОРЕНИЙ (ТЕОРЕМА КОРИОЛИСА)

Найдем зависимость между относительным, переносным и абсолютным ускорениями точки. Из равенства (84) получим

$$\bar{a}_{\text{аб}} = \frac{d\bar{v}_{\text{аб}}}{dt} = \frac{d\bar{v}_{\text{от}}}{dt} + \frac{d\bar{v}_{\text{пер}}}{dt}. \tag{85}$$

Производные здесь определяют изменение каждого из векторов при абсолютном движении. Эти изменения слагаются в общем случае из изменений при относительном и при переносном движениях, что ниже будет непосредственно показано. Следовательно, если условиться изменения, которые векторы $\bar{v}_{\text{от}}$ и $\bar{v}_{\text{пер}}$ получают *при относительном движении*, отмечать индексом «1», а *при переносном движении* — индексом «2», то равенство (85) примет вид

$$\bar{a}_{\text{аб}} = \frac{(d\bar{v}_{\text{от}})_1}{dt} + \frac{(d\bar{v}_{\text{от}})_2}{dt} + \frac{(d\bar{v}_{\text{пер}})_1}{dt} + \frac{(d\bar{v}_{\text{пер}})_2}{dt}. \tag{86}$$

Но по определению (см. § 64, п. 1) *относительное ускорение характеризует изменение относительной скорости только при относительном движении*; движение осей $Oxyz$, т. е. переносное движение при этом во внимание не принимается. Поэтому

$$\bar{a}_{\text{от}} = \frac{(d\bar{v}_{\text{от}})_1}{dt}. \tag{87}$$

В свою очередь, *переносное ускорение характеризует изменение переносной скорости только при переносном движении*, так как $\bar{a}_{\text{пер}} = \bar{a}_m$ (см. § 64, п. 2), где m — точка, неизменно связанная с осями $Oxyz$ и, следовательно, получающая ускорение только при движении вместе с этими осями, т. е. при переносном движении. Поэтому

$$\bar{a}_{\text{пер}} = \frac{(d\bar{v}_{\text{пер}})_2}{dt}. \tag{88}$$

В результате из равенства (86) получим

$$\bar{a}_{\text{аб}} = \bar{a}_{\text{от}} + \bar{a}_{\text{пер}} + \frac{(d\bar{v}_{\text{от}})_2}{dt} + \frac{(d\bar{v}_{\text{пер}})_1}{dt}. \tag{89}$$

160

Введем обозначение

$$\bar{a}_{\text{кор}} = \frac{(d\bar{v}_{\text{от}})_2}{dt} + \frac{(d\bar{v}_{\text{пер}})_1}{dt}. \tag{90}$$

Величина $\bar{a}_{\text{кор}}$, характеризующая изменение относительной скорости точки при переносном движении и переносной скорости точки при ее относительном движении, называется поворотным, или кориолисовым, ускорением точки. В результате равенство (89) примет вид

$$\bar{a}_{\text{аб}} = \bar{a}_{\text{от}} + \bar{a}_{\text{пер}} + \bar{a}_{\text{кор}}. \tag{91}$$

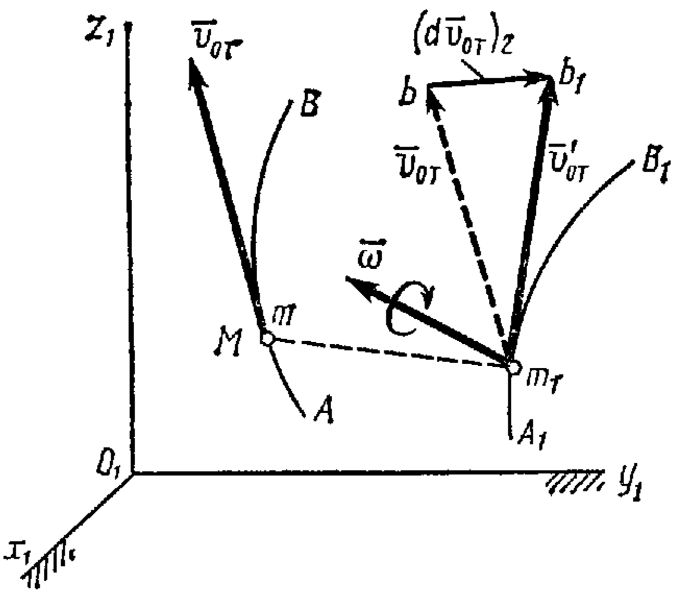


Рис. 188

Формула (91) выражает следующую теорему Кориолиса о сложении ускорений*: *при сложном движении ускорение точки равно геометрической сумме трех ускорений: относительного, переносного и поворотного, или кориолисова.*

Найдем для вычисления $\bar{a}_{\text{кор}}$ формулу, вытекающую из равенства (90). При этом, рассматривая общий случай, будем считать переносное движение, т. е. движение подвижных осей $Oxyz$, а с ними и кривой AB (см. рис. 182), слагающимся из поступательного движения вместе с некоторым полюсом и вращения вокруг этого полюса с угловой скоростью $\bar{\omega}$, называемой *переносной угловой скоростью.* Величина $\bar{\omega}$, как показано в § 63, от выбора полюса не зависит и на изображенных рис. 188, где полюс точка m, и рис. 189, где полюс O, имеет одно и то же значение.

Начнем с определения $(d\bar{v}_{\text{от}})_2/dt$. При рассматриваемом переносном движении вектор $\bar{v}_{\text{от}}$, направленный по касательной к кривой AB, переместится вместе с этой кривой поступательно (придет в положение $\overline{m_1b}$, рис. 188) и одновременно повернется вокруг точки m_1 до положения $\overline{m_1b_1}$. В результате вектор $\bar{v}_{\text{от}}$ получит в переносном движении приращение $(d\bar{v}_{\text{от}})_2 = \overline{bb_1} = \bar{v}_b \cdot dt$, где $\bar{v}_b$ — скорость, с которой перемещается точка b при повороте вектора $\overline{m_1b} = \bar{v}_{\text{от}}$ вокруг точки m_1. Так как этот поворот происходит с угловой скоростью $\bar{\omega}$, то по формуле (76) $\bar{v}_b = \bar{\omega} \times \overline{m_1b} = \bar{\omega} \times \bar{v}_{\text{от}}$. В результате получаем $(d\bar{v}_{\text{от}})_2 = \bar{v}_b \cdot dt = \bar{\omega} \times \bar{v}_{\text{от}} dt$ и

$$\frac{(d\bar{v}_{\text{от}})_2}{dt} = \bar{\omega} \times \bar{v}_{\text{от}}. \tag{92}$$

Теперь определим $(\mathrm{d}v_{\text{пер}})_1/\mathrm{d}t$. Скорость $v_{\text{пер}}$ равна скорости той неизменно связанной с подвижными осями точки m кривой AB, с которой в данный момент времени совпадает точка M (рис. 189). Если точку O принять за полюс и обозначить через $\bar{r}$ вектор $\overline{Om}=\overline{OM}$, то по формуле (81)

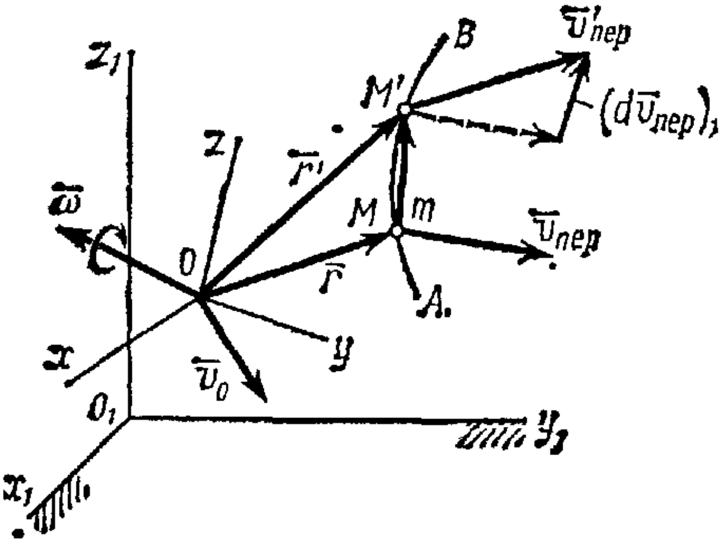


Рис. 189

$$\bar{v}_{\text{пер}}=\bar{v}_0+\bar{\omega}\times\bar{r}.$$

Совершив за промежуток времени $\mathrm{d}t$ относительное перемещение $\overline{MM'}=\bar{v}_{\text{от}}\cdot\mathrm{d}t$, точка придет в положение M', для которого $\bar{r}'=\bar{r}+\overline{MM'}$ и

$$\bar{v}'_{\text{пер}}=\bar{v}_0+\bar{\omega}\times\bar{r}'=$$
$$=\bar{v}_0+\bar{\omega}\times(\bar{r}+\overline{MM'}).$$

Следовательно, вследствие того, что точка совершает относительное перемещение $\overline{MM'}=\bar{v}_{\text{от}}\mathrm{d}t$, вектор $\bar{v}_{\text{пер}}$ получает приращение

$$(\mathrm{d}\bar{v}_{\text{пер}})_1=\bar{v}'_{\text{пер}}-\bar{v}_{\text{пер}}=\bar{\omega}\times\overline{MM'}=\bar{\omega}\times\bar{v}_{\text{от}}\,\mathrm{d}t,$$

откуда

$$\frac{(\mathrm{d}\bar{v}_{\text{пер}})_1}{\mathrm{d}t}=\bar{\omega}\times\bar{v}_{\text{от}}. \tag{93}$$

Подставляя величины (92) и (93) в равенство (90), получим

$$\bar{a}_{\text{кор}}=2\,(\bar{\omega}\times\bar{v}_{\text{от}}). \tag{94}$$

Таким образом, *кориолисово ускорение равно удвоенному векторному произведению переносной угловой скорости* (угловой скорости подвижной системы отсчета) *на относительную скорость точки*.

С л у ч а й п о с т у п а т е л ь н о г о п е р е н о с н о г о д в и ж е н и я. В этом случае $\omega=0$ и, следовательно, $\bar{a}_{\text{кор}}=0$. В результате равенство (91) дает*

$$\bar{a}_{\text{аб}}=\bar{a}_{\text{от}}+\bar{a}_{\text{пер}}. \tag{95}$$

Равенство (85) вопросов не вызывает. Абсолютное ускорение действительно определяется как сумма относительного ускорения и переносного ускорения, т.е. как сумма двух движений. А вот равенство (86) уже не бесспорно. Автор свои обозначения почему-то подробно не объясняет, хотя задуматься есть над чем. Что такое, например относительное ускорение при переносном движении и переносное ускорение при относительном движении?

Тарг не поясняет относительно чего должно быть измерено, по его мнению, относительное ускорение при переносном движении. Лингвистически приведенное выражение может быть истолковано как непосредственно **относительное ускорение по определению,** так и **абсолютное ускорение,** как сумма всех движений. Аналогично можно сказать и о переносном ускорении при относительном движении. Лингвистически определение Тарга относительно переносного ускорения также может быть истолковано как непосредственно переносное ускорение по определению или опять же, как абсолютное ускорение, если воспринимать приведенное выражение, как одновременный учет относительного и переносного движений и порождаемого ими поворотного движения.

Конкретный смысл лингвистических выражений можно установить только по математическим выражениям, точно также как приходилось уточнять смысл определений по математическим выражениям и в работе Матвеева (см. выше). Судя по обозначениям (90) первоисточника в определениях Тарга речь идёт о двух составляющих поворотного ускорения Кориолиса, дополняющих переносное и относительное ускорения в отсутствии друг друга до ускорений с учетом их влияний друг на друга. Все классики, занимающиеся изучением явления Кориолиса удивительно единодушны, в своем нежелании обозначить четкий физический эквивалент приращению относительной скорости по направлению и таким образом, определить четкий физический смысл ускорения Кориолиса. Отсутствие чёткого физического смысла определяет, на наш взгляд, и отсутствие чётких и однозначных лингвистических формулировок.

Формулировки приращений переносного и относительного ускорений за счет ускорения Кориолиса практически у **всех классиков,** занимающихся изучением явления Кориолиса расплывчаты и неопределенны, как в данном случае у Тарга . На наш взгляд, нечёткость лингвистических формулировок является следствием неразрешенных противоречий вращательного движения, которые являются и противоречиями классической модели поворотного движения. Приращения относительного ускорения при переносном движении и переносного ускорения при относительном движении, как две самостоятельные составляющие ускорения Кориолиса не имеют строго физического обоснования ни у одного из классиков. По нашему мнению, ускорение Кориолиса это общая часть относительного ускорения при переносном движении и переносного ускорения при относительном движении, а не отдельное самостоятельное приращение каждого из этих движений. То есть приращения относительного движения при переносном движении и приращение переносного движения при относительном движении это одна и та же физическая величина.

То, что представлено в первой части доказательства Тарга, по сути, является выводом формулы ускорения по изменению направления относительной скорости, т.е. через годограф относительной скорости. Но ускорение по изменению направления относительной скорости по физическому смыслу одновременно приводит к изменению линейной скорости по абсолютной величине. При дифференцировании изменения относительной скорости по направлению и получается, на наш взгляд, полное ускорение Кориолиса. Точно также как и при дифференцировании прироста линейной скорости по абсолютной величине, который рассматривается во второй части доказательства Тарга. На наш взгляд это два равнозначных способа определения одного и того же поворотного ускорения Кориолиса.

Работа Тарга, на наш взгляд, полностью повторяет работу А. Н. Матвеева «Механика и теория относительности», 3-е издание, Москва, «ОНИКС 21 век», «Мир и образование», 2003 г., допущенную в качестве учебника для студентов высших учебных заведений. Соответственно все наши замечания к выводу формулы ускорения Кориолиса в работе Матвеева мы можем переадресовать и к Таргу.

Кроме рассмотренных выше геометрических выводов ускорения Кориолиса существуют так называемые аналитические методы определения ускорения Кориолиса через дифференцирование приращения координат абсолютного движения.

4.3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА И. М. ВОРОНКОВА

И. М. Воронков в «Курсе теоретической механики» ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ МОСКВА 1954 § 91. Теорема Кориолиса определяет полное ускорение следующим образом (см. Рис.4.2):

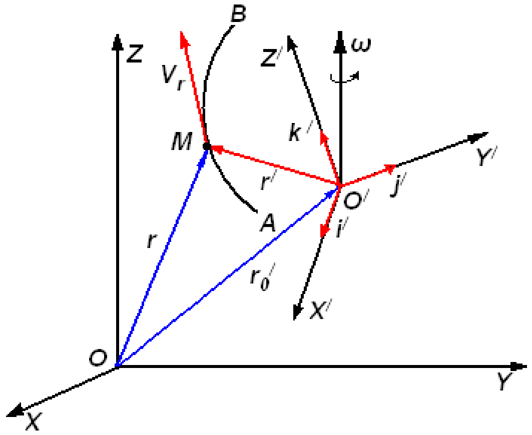


Рис. 4.2

$r = r_0' + r'$

$r' = x' * i' + y' * j' + z' * k'$

$r = r_0' + x' * i' + y' * j' + z' * k'$

Переносная скорость (v_e) равна производной от радиус-вектора **(r)** по d(t) при переменных **ортах i, j, k**:

$v_e = dr_o'/dt + x' di'/dt + y' dj'/dt + z' dk'/dt$

Переносное ускорение **(w_e)** равно производной переносной скорости (v_e) по (dt), при переменных **ортах i, j, k** и постоянных координатах **x', y', z'**:

$\mathbf{w_e = d^2r_o'/dt^2 + x'd^2i'/dt^2 + y'd^2j'/dt^2 + z'd^2k'/dt^2}$

Относительная скорость **(v_r)** равна производной (r') по (dt) при переменных координатах **x', y', z'** и постоянных **ортах i, j, k**:

$v_r = i'dx'/dt + j\, dy'/dt + k'd z'/dt$

После дифференцирования последнего выражения при **постоянных ортах i, j, k** получим относительное ускорение **(w_r):**

$\mathbf{w_r = id^2x'/dt^2 + jd^2y'/dt^2 + kd^2z'/dt^2}$

Далее для определения абсолютного ускорения (**w_a**), Воронков предлагает продифференцировать по времени левые и правые части выражения для абсолютной скорости **(v_a)** при **переменных координатах** **(x',y',z',i',j',k'):**

$\mathbf{v_a = v_e + v_r}$

$\mathbf{w_a = dv_a/dt = dv_r/dt + dv_e/dt}$

$dv_e/dt = d^2r_o'/dt^2 + x'd^2i'/dt^2 + y'd^2j'/dt^2 + z'd^2k'/dt^2 + (dx'/dt * di'/dt + dy'/dt * dj'/dt + d z'/dt * dk'/dt) =$

$= w_e + (dx'/dt * di'/dt + dy'/dt * dj'/dt + d z'/dt * dk'/dt)$

$dv_r/dt = id^2x'/dt^2 + jd^2y'/dt^2 + kd^2z'/dt^2 + (dx'/dt * di'/dt + dy'/dt * dj'/dt + + d z'/dt * dk'/dt) =$

$= w_r + (dx'/dt * di'/dt + dy'/dt * dj'/dt + d z'/dt * dk'/dt)$

учитывая, что :

$di'/dt = v_r(i') = \omega * i'$

$dj'/dt = v_r(j') = \omega * j'$

$dk'/dt = v_r(k') = \omega * k'$,

то выражение в скобках в уравнениях для (dv_e/dt) и для (dv_r/dt) примет вид:

$\mathbf{(dx'/dt * di'/dt + dy'/dt * dj'/dt + d z'/dt * dk'/dt) = \omega * v_r}$

Подставляя в уравнение для (dv_e/dt) и для (dv_r/dt) вместо скобок выражение **($\omega * v_r$)**, получим:

$\mathbf{dv_e/dt = w_e + \omega * v_r}$

$\mathbf{dv_r/dt = w_r + \omega * v_r}$

Складывая два последних выражения, определим абсолютное ускорение (**w_a**):

$\mathbf{w_a = w_e + w_r + 2 * \omega * v_r}$

Воронков, к сожалению, не дает разъяснений, касающихся физического смысла производных по времени **(dv_e/dt)** и **(dv_r/dt)** при переменных значениях **(x',y',z',i',j',k'),** хотя это, на наш взгляд, очень важно с точки зрения физического смысла поворотного ускорения Кориолиса, о чём мы говорили при анализе вывода Тарга. Рассмотрим подробнее дифференцирование переносной скорости при переменных координатах **(x',y',z',i',j',k')**. Дифференциал **(dv_e/dt)** при переменных **(i',j',k')** это есть непосредственно переносное ускорение **(w_e)** по определению**.** А дифференциал переносной скорости **(dv_e/dt)** при переменных **(x',y',z')** учитывает дополнительное изменение переносной скорости при осуществлении относительного движения. Действительно, продифференцируем переносную скорость при переменных **(x',y',z'):**

$v_e/dt = (dr_o'/dt + x' di'/dt + y' dj'/dt + z' dk'/dt)/dt$

Дифференциал ($dr_o^/$/dt) = 0, т.к. радиус-вектор (r_o) не зависит от переменных **($x^/,y^/,z^/$).** При дифференцировании оставшихся членов в выражении для относительной скорости (v_e) при переменных **($x^/,y^/,z^/$)** получаем:

$v_e/dt = (\mathbf{x}^/ di^//dt + \mathbf{y}^/dj^//dt + \mathbf{z}^/dk^//dt)/dt = (\mathbf{dx^/ /dt} * di^//dt + \mathbf{dy^//dt} * dj^//dt + \mathbf{d\,z^//dt} * dk^//dt) = \boldsymbol{\omega} * \mathbf{v_r}$

Таким образом, переносное ускорение тела при относительном движении это сумма переносного ускорения точки подвижной системы, в которой в данный момент времени находится тело и **дополнительного ускорения Кориолиса.**

Аналогичным образом рассмотрим подробнее дифференцирование относительной скорости **(dv_r/dt)** при переменных значениях **($x^/,y^/,z^/,i^/,j^/,k^/$).** Дифференциал относительной скорости **(dv_r/dt)** при переменных **($x^/,y^/,z^/$)** это есть непосредственно относительное ускорение (w_r) по определению. А дифференциал относительной скорости **(dv_r/dt)** при переменных **($i^/,j^/,k^/$)** учитывает дополнительное изменение относительной скорости при осуществлении переносного движения.

Продифференцируем переносную скорость при переменных **($i^/,j^/,k^/$):**

$dv_r/dt = (i^/dx^//dt +j\, dy^//dt + k^/d\,z^//dt)/dt = (dx^/ /dt * \mathbf{di^//dt} + dy^//dt * \mathbf{dj^//dt} + d\,z^//dt * \mathbf{dk^//dt}) = \boldsymbol{\omega} * \mathbf{v_r}$

Таким образом, относительное ускорение тела при переносном движении это сумма относительного ускорения и **дополнительного ускорения Кориолиса.**

Относительное ускорение при переносном движении отличается от относительного ускорения в отсутствии переносного движения на величину ускорения Кориолиса. Точно также как переносное ускорение при относительном движении отличается от переносного ускорения в отсутствии относительного движения на ту же самую величину. В обоих случаях и при дифференцировании **(dv_e/dt)** при переменных координатах **($x^/,y^/,z^/$),** и при дифференцировании **(dv_r/dt)** при переменных **($i^/,j^/,k^/$)** фактически дифференцируется одна и та же поворотная часть одного и того же абсолютного ускорения. Поэтому присутствие в классической формуле абсолютного ускорения двойных членов поворотного ускорения Кориолиса означает, что одно и то же поворотное ускорение учтено дважды. Реальное абсолютное ускорение сложного движения, по нашему мнению, определяется выражением:

$\mathbf{w_a = w_e + w_r + \boldsymbol{\omega} * v_r}$

Воронков безупречно выполнил математические преобразования, которые основаны на неправильном, на наш взгляд, представлении о приращении поворотного движения и природе ускорения Кориолиса, т.е. математический аппарат дифференцирования поворотного движения имеет под собой неправильную физическую базу. В результате поворотное ускорение Кориолиса в выражении для абсолютного ускорения в выводе Воронкова, как и у других авторов, завышено вдвое за счет двойного учета одной и той же физической величины.

Аналитические выводы уравнения абсолютного ускорения и ускорения Кориолиса не ограничиваются методом, предложенным Воронковым. В теоретической механике представлены и другие варианты аналитического определения ускорения Кориолиса, которые по физической сущности мало чем отличаются от рассмотренного вывода Воронкова.

4.4. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ВЫВОД УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА Н. Е. ЖУКОВСКОГО И П. АППЕЛЯ

Так Жуковский Н. Е. в уже упомянутом выше труде (Н. Е. Жуковский, «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА», ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, МОСКВА-ЛЕНИНГРАД, 1952г.) в разделе «Определение ускорения Кориолиса аналитическим путем» и П. Аппель («Теоретическая механика» том первый ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ МОСКВА 1960) определяют абсолютное ускорение следующим образом.

Жуковский и Аппель в отличие от Воронкова находят уравнение для абсолютного ускорения путем двойного дифференцирования приращения абсолютных координат в неподвижной системе координат. Абсолютные координаты определяются через координаты подвижной системы координат при помощи косинусов углов Эйлера. При этом в уравнении для абсолютного ускорения присутствуют выражения для переносного ускорения, относительного ускорения и дополнительного поворотного ускорения Кориолиса.

Координата (x) в неподвижной системе координат, выраженная через координаты подвижной системы координат при помощи косинусов углов Эйлера определяется выражением (нумерация формул оригинальная):

$\mathbf{x = x_0 + a{*}x^/ + в{*}y^/ + c{*}z^/,}$ (1.41)

где:

$\mathbf{x_0}$ – радиус-вектор абсолютной системы координат, определяющий начало подвижной системы координат;

$x^/$, $y^/$, $z^/$ - оси подвижной системы координат;

x, y, z – оси абсолютной системы координат;

а, в, с – косинусы углов между соответствующими подвижными и неподвижными осями.

После двойного дифференцирования уравнения (1.41) получаем выражение для ***a*(абс)**:

$$a(\text{абс}) = d^2x_0/dt^2 + x^/d^2a/dt^2 + y^/d^2в/dt^2 + z^/d^2c/dt^2 + (da/dt * dx^//dt + dв/dt * dy/dt + dc/dt * dz/dt) +$$
$$+ id^2x^//dt^2 + jd^2y^//dt^2 + kd^2z^//dt^2 + (da/dt * dx^//dt + dв/dt * dy/dt + dc/dt * dz/dt) \quad \textbf{(1.42)}$$

где:

$w_e = d^2x_0/dt^2 + x^/d^2a/dt^2 + y^/d^2в/dt^2 + z^/d^2c/dt^2$ **– переносное ускорение**

$w_r = id^2x^//dt^2 + jd^2y^//dt^2 + kd^2z^//dt^2$ **– относительное ускорение**

$w_k = 2* (da/dt * dx^//dt + dв/dt * dy/dt + dc/dt * dz/dt)$ **– ускорение Кориолиса**

Таким образом, при дифференцировании абсолютных координат сложного движения по методу Жуковского и Аппеля поворотное ускорение Кориолиса также как и у Воронкова, вдове превышает значение ускорения Кориолиса в нашей версии. Вывод ускорения Кориолиса в редакции Жуковского и в редакции Аппеля ничем принципиально не отличается от вывода Воронкова, т.к. дифференциал суммы равен сумме дифференциалов.

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ КРИВОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ.

Дифференцирование по времени является абстрактным математическим методом определения мгновенного значения переменных во времени величин путём минимизации случайной погрешности абсолютного значения переменной величины в минимальном интервале времени. При дифференцировании устраняются случайные количественные погрешности, связанные с непредсказуемыми флуктуациями переменной физической величины, которыми после минимизации можно пренебречь. Методические погрешности, связанные с несоответствием физической величины её физической сущности при дифференцировании также могут минимизироваться. Однако пренебречь методическими погрешностями без искажения физической сущности, заложенной в данный метод определения физической величины невозможно. Таким образом, методические ошибки при дифференцировании физически не устраняются.

В классической модели вращательного движения центростремительное ускорение определяется дифференцированием классического разностного вектора (ΔV), который физически не является приращением скорости равномерного вращательного движения. При минимизации интервала времени длина разностного вектора (ΔV) количественно приближается к длине дуги окружности, описанной вектором линейной скорости равномерного вращательного движения. Однако физически в любом сколь угодно малом интервале времени хорда никогда не станет дугой окружности, которая на неё опирается, т.е. с физической точки зрения классический разностный вектор никогда не станет приращением вращательного движения. Таким образом, классическое центростремительное ускорение только количественно в некотором приближении может соответствовать реальному ускорению направления, но никогда не соответствует реальному ускорению направления равномерного вращательного движения физически.

Правильный результат ускорения направления при дифференцировании классического разностного вектора получен только благодаря тому, что вопреки логике, заложенной в классический метод определения приращения равномерного вращательного движения, как линейного разностного вектора (ΔV) бесконечно малая хорда в минимальном интервале времени в конечном итоге подменяется дугой, описанной вектором линейной скорости. Таким образом, по ходу самого вывода опровергаются его же первоначальные установки, и кардинально изменяется физическая сущность приращения равномерного вращательного движения первоначально связанная с линейным разностным вектором (ΔV). Без такой подмены, которая неприемлема с точки зрения векторной геометрии, классическое центростремительное ускорение не имеет физического смысла, т.е. для решения подобных задач векторная геометрия неприемлема.

При определении классического центростремительного ускорения в реальных расчётах фактически участвует не хорда, представляющая собой классический разностный вектор (ΔV), а опирающаяся на неё дуга, которая является годографом скорости равномерного вращательного движения. Таким образом, реальное значение центростремительного ускорения в классической физике достигается по сути дела не дифференцированием классического разностного вектора, при котором происходит только минимизация возможных погрешностей, в том числе и методических, а переходом от бесконечно малой хорды к бесконечно малой дуге, т.е. к реальному приращению вращательного движения.

Дифференцирование только логически обосновывает необходимость перехода от хорды к дуге окружности, но не устраняет физического несоответствия классического разностного вектора реальному приращению вращательного движения. Математическая операция дифференцирования, не имеющая прямого отношения к физической сущности явления, не предполагает безусловного исключения погрешности определяемой величины в минимальном интервале времени. При дифференцировании погрешность только минимизируется. Решение о значимости погрешности принимается на физическом уровне. Если после минимизации погрешности было бы сделано правильное решение о фактическом соответствии приращения равномерного вращательного движения годографу линейной скорости, то возможно центростремительное ускорение равномерного вращательного движения сегодня не определялось бы дифференцированием и не ассоциировалось бы с линейным ускорением, направленным к центру вращения. А классическая модель вращательного движения в её сегодняшнем виде была бы признана недействительной.

Дифференцирование классического разностного вектора (ΔV) не только не даёт физического представления о центростремительном ускорении, как ускорении направления вращательного движения, но, напротив, подчеркивает физическое несоответствие классического центростремительного ускорения реальному ускорению равномерного вращательного движения в любом сколь угодно малом интервале времени. Пренебрежение методической погрешностью, которая определяет принципиальные физические различия методов определения ускорения направления, уводит академическую науку в сторону от физической сущности преобразования движения по направлению.

Для определения приращения вектора линейной скорости в общем случае криволинейного движения минимизация случайной погрешности, конечно же, необходима. Однако даже в общем случае криволинейного движения, в котором вектор линейной скорости изменяется как по величине, так и по направлению дифференцированию с физической точки зрения подлежит не прямолинейный разностный вектор, определённый в соответствии с правилами векторной геометрии, а годограф линейной скорости. Методические ошибки определения параметров криволинейного движения при помощи дифференцирования без учёта физической сущности изменения линейной скорости движения по направлению, на наш взгляд, искажают физическую сущность не только ускорения вращательного движения, но и физическую сущность поворотного движения, в котором проявляется сила и ускорение Кориолиса.

Результаты классических методов определения ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении хорошо согласуются между собой. Геометрический и аналитический методы определения ускорения Кориолиса дают одинаковый результат. Таким образом, создаётся иллюзия, что сходимость геометрических и аналитических методов определения ускорения Кориолиса в классической физике подтверждают правильность классических теоретических положений о физической сущности ускорения Кориолиса. Однако, на наш взгляд, во всех рассмотренных методах определения ускорения Кориолиса допущена одна и та же методическая ошибка, связанная с неправильным дифференцированием поворотного движения, в соответствии с которым поворотное движение осуществляется при неизменных координатах подвижной системы координат, а прирост радиуса поворотного движения осуществляется при неизменных координатах абсолютной системы координат.

Радиус поворотного движения изменяется не только от одного минимального интервала времени к другому, как следует из классической модели поворотного движения, но и внутри каждого интервала времени дифференцирования и определяется текущей проекцией траектории относительного движения на радиус переносного вращения. Причём переносное и относительное движения осуществляются одновременно. Поэтому для правильной оценки приращения поворотного движения связанного с радиальным движением необходимо учитывать средний радиус поворота в любом сколь угодно малом интервале времени, но никак, не радиус соответствующий начальному, конечному или какому-либо другому моменту интервала времени дифференцирования без учёта всех остальных значений радиуса поворота в этом интервале времени.

При дифференцировании изменяющихся во времени физических величин их значение определяется как среднее значение физической величины в каждом минимальном интервале времени, в то время как при дифференцировании поворотного движения от этого правила в классической физике почему-то отступают. Дифференцированием поворотного движения в классической физике определяется только среднее значение поворотного ускорения, но не учитывается изменение радиуса поворотного движения, определяющего реальную девиацию, т.е. приращение поворотного движения в каждом минимальном интервале времени. Вместо среднего значения дуги поворотного движения, являющегося реальной девиацией поворотного движения в каждом интервале времени дифференцирования за девиацию поворотного движения необоснованно принимается дуга окружности, очерченная максимальным в рассматриваемом интервале времени радиусом поворотного движения, что не соответствует общим принципам дифференцирования переменных физических величин. В результате приращение поворотного движения в классической физике определено неверно.

Конечно, с точки зрения математики учитывать какие-либо изменения физической величины внутри бесконечно малого интервала времени, наверное, нет необходимости, поскольку такие изменения бесконечно малы. Однако в физике необходимо учитывать все изменения физической величины в каждом бесконечно малом интервале времени. С точки зрения физики потеря или не учёт даже нескольких значений физической величины в минимальном интервале времени дифференцирования в реальном масштабе времени может привести к значительным отклонениям от реальной оценки физической величины, что и происходит в классической физике при определении приращения поворотного движения.

В классической физике при определении приращения поворотного движения игнорируются практически все реальные значения радиуса, кроме его максимального значения в конце рассматриваемого интервала времени дифференцирования. Поэтому величина приращения поворотного движения в каждом минимальном интервале времени дифференцирования оказывается завышенной вдвое по отношению к реальному приращению поворотного движения. Уменьшение дискретности дифференцирования позволяет свести погрешность определения физической величины в рассматриваемом интервале времени к минимуму. Однако при уменьшении дискретности дифференцирования сводятся к минимуму только случайные погрешности, связанные с непредсказуемым отклонением реальной физической от величины от среднего значения физической величины в рассматриваемом интервале времени. Методические ошибки, связанные с неправильной физической оценкой приращения физической величины, через которое в дальнейшем методом дифференцирования определяется её среднее значение в минимальном интервале времени, являются абсолютными и не устраняются при дифференцировании.

Принципиальный недостаток исследования физических закономерностей математическими методами состоит в том, что математические методы сами по себе не имеют физического смысла. Поэтому применение математического аппарата для установления физических закономерностей должно, прежде всего, отвечать физической сущности явления, а не математическим законам. Правильные математические операции, не опирающиеся на физическую сущность явления, косвенно закрепляет допускаемые иногда методические ошибки в определении физических явлений. При этом сходимость конечных результатов различных методов, содержащих одну и ту же методическую ошибку, создает иллюзию правильности теоретических положений в отношении физических явлений, лишь на том основании, что эти теоретические положения получены в ходе правильных с точки зрения математики преобразований. Возможно, что и теоретические представления об ускорении Кориолиса сложились в классической физике лишь на основании классической модели дифференцирования поворотного движения. При этом классическая модель поворотного движения содержит множество неразрешённых с физической точки зрения противоречий.

6. КРИТЕРИЙ ИСТИННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ КОРИОЛИСА.

Как показано выше ни один из авторов не дал чёткого и непротиворечивого физического обоснования классической формулы ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении. Как впрочем, нет физического обоснования в классической физике и формулы для ускорения Кориолиса при относительном движении, перпендикулярном радиусу. Формула ускорения Кориолиса при относительном движении, перпендикулярном радиусу в классической физике определена только математически, как формула разложения суммы квадратов двух чисел. Физического обоснования этой формулы в классической физике нет.

Все существующие в современной физике выводы ускорения Кориолиса по своей физической сущности как две капли воды похожи друг на друга и отличаются только в совершенно непринципиальных деталях. Основной упор во всех существующих на сегодняшний день выводах ускорения Кориолиса делается на математическое описание явления. Работы таких авторов, как С. Э. Хайкин, Р. Фейман, А. Зоммерфельд не добавляют ничего существенного в понимание физики явления Кориолиса в дополнение к приведённым выше работам. Ни один из авторов не раскрывает физической сущности явления Кориолиса. Г.С. Ландсберг, например, в «ЭЛЕМЕНТАРНОМ УЧЕБНИКЕ ФИЗИКИ», М.., ФИЗМАТЛИТ, 2004 вообще не приводит вывода формулы ускорения. Ландсберг пишет, что вывод формулы *«для движений тела, происходящих в плоскости, перпендикулярной оси вращения не приводится в виду* ***сложности такого расчёта».*** Сложность действительно есть, но заключается она не в математических преобразованиях, которые как раз не представляют большой сложности, а в определении физической сущности явления.

В нашей версии ускорение Кориолиса значительно отличается от классического ускорения Кориолиса, как по величине, так и по физической сущности. Поэтому необходимо найти некоторый критерий истинности, позволяющей разрешить имеющиеся разногласия. Наиболее правильным путём определения ускорения в общем случае любого движения, на наш взгляд, является дифференцирование годографа абсолютной скорости по времени, поскольку по определению и по своей физической сущности именно годограф является приращением скорости движения.

По определению приращением скорости произвольного движения является именно абсолютная величина годографа. Независимо от конфигурации годографа в пространстве и от его кривизны, он не может быть представлен как сочетание поступательных и вращательных движений в соответствии с классическими представлениями об осуществлении криволинейного движения, т.к. годограф вообще не является траекторией движения. Годограф это приращение скорости движения. Дифференцирование годографа, как было показано выше, эквивалентно дифференцированию приращения скорости прямолинейного движения, в котором отсутствует поворотное движение. Следовательно, при дифференцировании годографа методические ошибки, связанные с дифференцированием поворотного движения, которое на наш взгляд в классической физике осуществляется некорректно, отсутствуют.

Поэтому в качестве критерия истинности для определения ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении выберем ускорение Кориолиса, полученное методом дифференцирования годографа линейной скорости абсолютного движения. В некотором смысле критерием истинности ускорения Кориолиса может быть и поворотное ускорение, определённое через девиацию поворотного движения. Однако в классической физике девиация поворотного движения также как и дифференцирование поворотного движения определяется, на наш взгляд, некорректно. Зато в отличие от наших разногласий с классической физикой в отношении физической сущности девиации поворотного движения мы целиком и полностью согласны с классической физикой в определении ускорения любого движения через годограф скорости.

Рассмотрим простейший случай сложного движения (Рис. 6.1), в котором относительное движение равномерное и прямолинейное, а переносное движение осуществляется по окружности радиуса (r). Пусть движение происходит в одной плоскости, а вектор относительной скорости направлен вдоль радиуса поворотного вращения. Это еще более упрощенный случай, чем случай, рассмотренный Жуковским (см. выше). Такое движение соответствует радиальному движению тела на вращающемся плоском диске, которое в основном и рассматривается в данной работе.

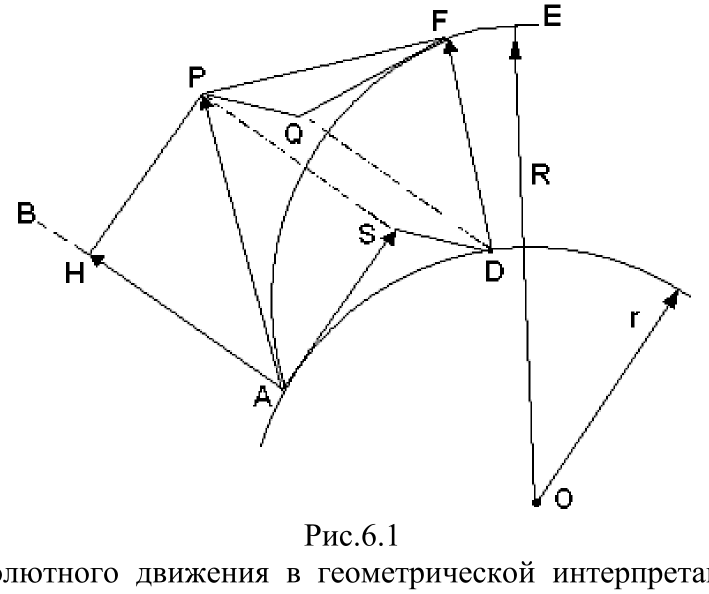
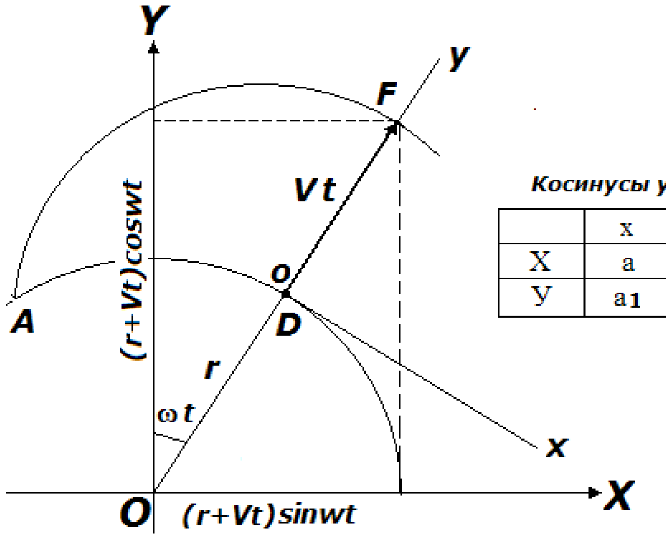


Рис.6.1

Найдем приращение абсолютного движения в геометрической интерпретации Н. Е. Жуковского и произведем его аналитический расчет. Все обозначения соответствуют Фиг. 46 в приведенной работе Жуковского. Определим координаты сложного движения в точке (F) в абсолютной системе координат через координаты подвижной системы координат, воспользовавшись таблицей девяти косинусов. Поскольку для простоты рассматриваемое движение осуществляется в одной плоскости, то в представленной на рисунке (6.2) таблице присутствует только четыре косинуса.



	x	y
X	a	b
У	a_1	b_1

Рис. 6.2

$X = r_x + a * x + b * y = r * \sin(\omega*t) + (a * x = 0) + V * t * \sin(\omega*t)$

Можно выразить координату (X) непосредственно в абсолютной системе координат как проекции на (X) радиуса (R = r + V * t). При этом получаем абсолютно идентичное выражение:

$X = (r + V * t) * \sin(\omega*t) = r * \sin(\omega*t) + V * t * \sin(\omega*t)$;

Определим (Y):

$Y = r_y + a_1 * x + b_1 * y = r * \cos(\omega*t) + (a_1 * x = 0) + V * t * \cos(\omega*t)$

Можно выразить координату (Y) непосредственно в абсолютной системе координат как проекции на (Y) радиуса (R = r + V * t). При этом получаем абсолютно идентичное выражение:

$Y = (r + V * t) * \cos(\omega*t) = r * \cos(\omega*t) + V * t * \cos(\omega*t)$;

Найдем абсолютную скорость и ускорение в точке (F). Для этого найдем первую и вторую производные координаты сложного движения в точке (F).

$dX/dt = r * \omega * \cos(\omega*t) + V * \sin(\omega*t) + V * t * \omega * \cos(\omega*t)$;

$d^2X/dt^2 = - r * \omega^2 * \sin(\omega*t) + V * \omega * \cos(\omega*t) + V * \omega * \cos(\omega*t) – V * t * \omega^2 * \sin(\omega*t) =$

$= - r * \omega^2 * \sin(\omega*t) + 2 * V * \omega * \cos(\omega*t) – V * t * \omega^2 * \sin(\omega*t)$;

$dy/dt = - r * \omega * \sin(\omega*t) + V * \cos(\omega*t) - V * t * \omega * \sin(\omega*t)$;

$d^2Y/dt^2 = - r * \omega^2 * \cos(\omega*t) - V * \omega * \sin(\omega*t) - V * \omega * \sin(\omega*t) - V * t * \omega^2 * \cos(\omega*t) =$

$= - r * \omega^2 * \cos(\omega*t) - 2 * V * \omega * \sin(\omega*t) - V * t * \omega^2 * \cos(\omega*t)$;

Возведем в квадрат производные (dX/dt) и (dY/dt) по правилу квадрата суммы трех слагаемых:

$(dX/dt)^2 = r^2 * \omega^2 * \cos^2(\omega*t) + V^2 * \sin^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^2 * \cos^2(\omega*t)+$

$+ 2*r * \omega * V * \cos(\omega*t)* \sin(\omega*t) + 2*V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) + 2*r * \omega^2 * V * t * \cos^2(\omega*t)$;

$(dY/dt)^2 = r^2 * \omega^2 * \sin^2(\omega*t) + V^2 * \cos^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^2 * \sin^2(\omega*t) -$

$- 2* r * \omega * V * \cos(\omega*t)* \sin(\omega*t) – 2 * V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)+ 2 * r * \omega^2 * V * t * \sin^2(\omega*t)$;

Сложив два последних выражения, найдем квадрат абсолютной скорости V^2абс:

$V^2абс = r^2 * \omega^2 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) +$

$+ V^2 * (\sin^2(\omega*t) + \cos^2(\omega*t)) +$

$+ V^2 * t^2 * \omega^2 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) +$

$+ 2*r * \omega * V * \cos(\omega*t)* \sin(\omega*t) +$

$(- 2* r * \omega * V * \cos(\omega*t)* \sin(\omega*t)) +$

$+ 2*V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) -$

$- 2 * V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)+$

$+2*r * \omega^2 * V * t * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t))$;

Учитывая, что:

1.слагаемые, отмеченные жирным курсивом (зеленый цвет), взаимно уничтожаются,

2.слагаемые, отмеченные жирным шрифтом (фиолетовый цвет) взаимно уничтожаются,

3.сумма $(\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) = 1$ (красный цвет)

Окончательно получаем:

$$\mathbf{Vабс = \sqrt{(r^2 * \omega^2 + V^2 + V^2 * t^2 * \omega^2 + 2 * r * \omega^2 * V * t)}} \qquad \mathbf{(6.1)}$$

Возведем в квадрат производные (d^2X/dt^2) и (d^2Y/dt^2) по правилу квадрата суммы трех слагаемых:

$(d^2X/dt^2)^2 = r^2 * \omega^4 * \sin^2(\omega*t) + 4 * V^2 * \omega^2 * \cos^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^4 * \sin^2(\omega*t) -$
$- 4 * V * r * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) - 4 * t * V^2 * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) + 2 * V * r * t * \omega^4 * \sin^2(\omega*t);$
$(d^2Y/dt^2)^2 = r^2 * \omega^4 * \cos^2(\omega*t) + 4 * V^2 * \omega^2 * \sin^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^4 * \sin^2(\omega*t) +$
$+ 4 * r * V * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) - 4 * t * V^2 * \omega^3 * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t) + 2 * V * r * t * \omega^4 * \cos^2(\omega*t);$

Сложив два последних выражения, найдем квадрат абсолютного ускорения R^2:

$R^2 = r^2 * \omega^4 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) +$
$+ 4 * V^2 * \omega^2 * (\sin^2(\omega*t) + \cos^2(\omega*t)) +$
$+ V^2 * t^2 * \omega^4 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) -$
$- \boldsymbol{4 * r * V^2 * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)} +$
$+ \boldsymbol{4 * r * V^2 * \omega^3 * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t)} -$
$\mathbf{- 4 * t * V^2 * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)} +$
$\mathbf{+ 4 * t * V^2 * \omega^3 * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t)} +$
$+ \underline{2 * V * r * t * \omega^4 * \sin^2(\omega*t)} + \underline{2 * V * r * t * \omega^4 * \cos^2(\omega*t)};$

Учитывая, что:

1.слагаемые, отмеченные жирным курсивом (зеленый цвет), взаимно уничтожаются,
2.слагаемые, отмеченные жирным шрифтом (фиолетовый цвет) взаимно уничтожаются,
3.слагаемые, отмеченные подчеркнутым шрифтом (коричневый цвет) взаимно уничтожаются,
4.сумма $(\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) = 1$ (красный цвет)

окончательно получаем:

$$\boldsymbol{a}\textbf{(абс)Ж} = \sqrt{(\mathbf{r^2 * \omega^4 + 4 * V^2 * \omega^2 + 2 * V * r * t * \omega^4})} \qquad \textbf{(6.2)}$$

Теперь определим координаты сложного движения в точке (F) при движении к центру вращения:

$X = r_x + a * x + b * y = r * \sin(\omega*t) + (a * x = 0) - V * t * \sin(\omega*t)$

Можно выразить координату (X) непосредственно в абсолютной системе координат как проекции на (X) радиуса ($R = r + V * t$). При этом получаем абсолютно идентичное выражение:

$X = (r + V * t) * \sin(\omega*t) = r * \sin(\omega*t) - V * t * \sin(\omega*t);$

Определим (Y):

$Y = r_y + a_1 * x + b_1 * y = r * \cos(\omega*t) + (a * x = 0) - V * t * \cos(\omega*t)$

Можно выразить координату (Y) непосредственно в абсолютной системе координат как проекции на (Y) радиуса ($R = r + V * t$). При этом получаем абсолютно идентичное выражение:

$Y = (r + V * t) * \cos(\omega*t) = r * \cos(\omega*t) - V * t * \cos(\omega*t);$

Найдем абсолютную скорость и ускорение в точке (F) при движении к центру. Для этого найдем первую и вторую производные координаты сложного движения в точке (F).

$dX/dt = r * \omega * \cos(\omega*t) - V * \sin(\omega*t) - V * t * \omega * \cos(\omega*t);$
$d^2X/dt^2 = - r * \omega^2 * \sin(\omega*t) - V * \omega * \cos(\omega*t) - V * \omega * \cos(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \sin(\omega*t) =$
$= - r * \omega^2 * \sin(\omega*t) - 2 * V * \omega * \cos(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \sin(\omega*t);$
$dy/dt = - r * \omega * \sin(\omega*t) - V * \cos(\omega*t) + V * t * \omega * \sin(\omega*t);$
$d^2Y/dt^2 = - r * \omega^2 * \cos(\omega*t) + V * \omega * \sin(\omega*t) + V * \omega * \sin(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \cos(\omega*t) =$
$= - r * \omega^2 * \cos(\omega*t) + 2 * V * \omega * \sin(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \cos(\omega*t);$

Возведем в квадрат производные (dX/dt) и (dY/dt) по правилу квадрата суммы трех слагаемых:

$(dX/dt)^2 = r^2 * \omega^2 * \cos^2(\omega*t) + V^2 * \sin^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^2 * \cos^2(\omega*t) + 4*r * \omega * V * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t) -$
$-4*V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) - 2*r * \omega^2 * V * t * \cos^2(\omega*t);$
$(dY/dt)^2 = r^2 * \omega^2 * \sin^2(\omega*t) + V^2 * \cos^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^2 * \sin^2(\omega*t) - 4* r * \omega * V * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t) + +$
$4 * V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * (\omega*t) - 2 * r * \omega^2 * V * t * \sin^2(\omega*t);$

Сложив два последних выражения, найдем квадрат абсолютной скорости V^2абс:

V^2абс $= r^2 * \omega^2 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) +$
$+ V^2 * (\sin^2(\omega*t) + \cos^2(\omega*t)) +$
$+ V^2 * t^2 * \omega^2 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) +$
$+ \boldsymbol{4 * r * \omega * V * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t)} +$
$- \boldsymbol{4 * r * \omega * V * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t)} +$
$\mathbf{+ 4 * V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)} -$
$\mathbf{- 4 * V^2 * t * \omega * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)} +$
$- 2*r * \omega^2 * V * t * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t));$

Учитывая, что:

1.слагаемые, отмеченные жирным курсивом (зеленый цвет), взаимно уничтожаются,
2.слагаемые, отмеченные жирным шрифтом (фиолетовый цвет) взаимно уничтожаются,
3.сумма $(\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) = 1$ (красный цвет)
Окончательно получаем:

$$\mathbf{V абс} = \sqrt{(r^2 * \omega^2 + V^2 + V^2 * t^2 * \omega^2 - 2 * r * \omega^2 * V * t)} \qquad \mathbf{(6.3)}$$

Возведем в квадрат производные (d^2X/dt^2) и (d^2Y/dt^2) по правилу квадрата суммы трех слагаемых:

$d^2X/dt^2 = - r * \omega^2 * \sin(\omega*t) - V * \omega * \cos(\omega*t) - V * \omega * \cos(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \sin(\omega*t) =$
$= - r * \omega^2 * \sin(\omega*t) - 2 * V * \omega * \cos(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \sin(\omega*t)$;
$(d^2X/dt^2)^2 = r^2 * \omega^4 * \sin^2(\omega*t) + 4 * V^2 * \omega^2 * \cos^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^4 * \sin^2(\omega*t) +$
$+ 4 * V * r * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) - 4 * t * V^2 * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) - 2 * V * r * t * \omega^4 * \sin^2(\omega*t)$;
$d^2Y/dt^2 = - r * \omega^2 * \cos(\omega*t) + V * \omega * \sin(\omega*t) + V * \omega * \sin(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \cos(\omega*t) =$
$= - r * \omega^2 * \cos(\omega*t) + 2 * V * \omega * \sin(\omega*t) + V * t * \omega^2 * \cos(\omega*t)$;
$(d^2Y/dt^2)^2 = r^2 * \omega^4 * \cos^2(\omega*t) + 4 * V^2 * \omega^2 * \sin^2(\omega*t) + V^2 * t^2 * \omega^4 * \sin^2(\omega*t) -$
$- 4 * r * V * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t) + 4 * t * V^2 * \omega^3 * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t) - 2 * V * r * t * \omega^4 * \cos^2(\omega*t)$;

Сложив два последних выражения, найдем квадрат безусловного ускорения R^2:

$R^2 = r^2 * \omega^4 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) +$
$+ 4 * V^2 * \omega^2 * (\sin^2(\omega*t) + \cos^2(\omega*t)) +$
$+ V^2 * t^2 * \omega^4 * (\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) -$
$- \boldsymbol{4 * r * V^2 * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)} +$
$+ \boldsymbol{4 * r * V^2 * \omega^3 * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t)} -$
$- \mathbf{4 * t * V^2 * \omega^3 * \sin(\omega*t) * \cos(\omega*t)} +$
$+ \mathbf{4 * t * V^2 * \omega^3 * \cos(\omega*t) * \sin(\omega*t)} -$
$- \underline{2 * V * r * t * \omega^4 * \sin^2(\omega*t)} - \underline{2 * V * r * t * \omega^4 * \cos^2(\omega*t)}$;

Учитывая, что:
1.слагаемые, отмеченные жирным курсивом (зеленый цвет), взаимно уничтожаются,
2.слагаемые, отмеченные жирным шрифтом (фиолетовый цвет) взаимно уничтожаются,
3.слагаемые, отмеченные подчеркнутым шрифтом (коричневый цвет) взаимно уничтожаются,
4.сумма $(\cos^2(\omega*t) + \sin^2(\omega*t)) = 1$ (красный цвет)
Окончательно получаем:

$$\boldsymbol{a}\mathbf{(абс)Ж} = \sqrt{(r^2 * \omega^4 + 4 * V^2 * \omega^2 - 2 * V * r * t * \omega^4)} \qquad \mathbf{(6.4)}$$

Преобразование абсолютной величины скорости в связи с изменением ее направления и непосредственное изменение вектора скорости по абсолютной величине в общем случае происходит за счет преобразования абсолютной величины скорости. В случае равномерного вращательного движения преобразование величины скорости происходит только в процессе изменения направления скорости и характеризуется ускорением направления или центростремительным ускорением. В общем случае сложного движения кроме преобразования величины скорости, связанной с изменением ее направления, может непосредственно происходить изменение вектора скорости по величине в каждом текущем направлении движения.

Рассмотренный пример сложного движения представляет собой, движение тела вдоль радиуса вращающейся системы с учетом ускорения Кориолиса. Траекторией такого движения является спираль. Абсолютное ускорение при движении тела по спирали характеризуется преобразованием величины скорости, связанной с изменением ее направления и непосредственным изменением вектора скорости по абсолютной величине. Изменение абсолютной скорости движения тела во всем диапазоне ее изменения по любой произвольной траектории определяет годограф абсолютной скорости.

На Рис.6.3 изображен годограф скорости движения тела по спирали для рассматриваемого сложного движения. Участок годографа абсолютной скорости (AC) в минимальном интервале времени (Δt) равен геометрической сумме двух других годографов в интервале времени (Δt): годографа вектора абсолютной скорости по направлению (AB) и годографа вектора абсолютной скорости по величине (BC).

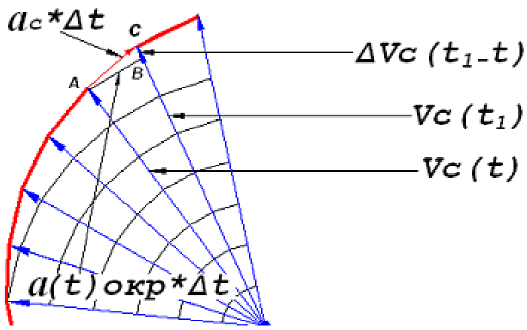


Рис. 6.3

Определим абсолютное ускорение движения по спирали в интервале времени Δt. Длину годографа (AC) в интервале времени Δt можно определить из прямоугольного треугольника (ABC) по теореме Пифагора (Рис. 6.3), как корень квадратный из суммы квадратов катетов (AB) и (BC):

$AC = a\text{c} * \Delta t = \sqrt{(AB)^2 + (BC)^2}$

$AB = a(t)\text{окр}*\Delta t = Vc(t)*\omega*\Delta t$ (6.5)

Где: ускорение $a(t)$окр – это проекция абсолютного ускорения движения по спирали на окружность с радиусом Vc(t);

$BC = (Vc(t_1) - Vc(t))*\Delta t$ (6.6)

Тогда абсолютное ускорение (a(абс)) равно:

$$\boldsymbol{a(\text{абс}) = AC/\Delta t = (\sqrt{((Vc(t_1)-Vc(t))*\Delta t)^2+(Vc(t)*\omega*\Delta t)^2})/\Delta t} \quad \textbf{(6.7)}$$

Составной частью абсолютного ускорения является ускорение Кориолиса, которое определяет изменение величины абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного вращения в процессе изменения направления радиальной скорости относительного движения и наоборот.

Выведем формулу ускорения Кориолиса для рассматриваемого сложного движения через переносное ускорение. Воспользуемся линейным эквивалентом ускорения Кориолиса:

$a\text{к} = \Delta V\text{л}/\Delta t$

Умножив и разделив полученное выражение для (aк) на угловую скорость (ω) получим:

$a\text{к} = (\omega*\Delta V\text{л})/(\omega*\Delta t)$

В числителе полученного выражения записана разность переносных ускорений (Δaе) при остановленном относительном движении в начале и в конце интервала времени (Δt), равная разности ускорений направления вращательного движения (Δa(цт)) с текущими радиусами вращения в моменты времени, отстоящими друг от друга на интервал времени (Δt):

$\Delta a\text{е} = \Delta a(\text{цт}) = \omega*\Delta V\text{л}$

Тогда выражение для (aк) приобретает вид:

$$\boldsymbol{a\text{к} = \Delta a\text{е}/\omega*\Delta t = \Delta a(\text{цт})/\omega*\Delta t} \quad \textbf{(6.8)}$$

Используя полученные формулы для абсолютного ускорения, рассмотренного сложного движения построим графики:

1. **(*a*цт)** – график центростремительного ускорения вращательного движения с текущим физическим радиусом (переносное ускорение);
2. ***a*(абс)Ж** – график абсолютного ускорения по Жуковскому по формуле (6.4);
3. ***a*(абс)Г** – график абсолютного ускорения вычисленного через годограф линейной скорости спирали по формуле (6.7);
4. **(*a*кк)** – график классического ускорения Кориолиса;
5. **(*a*к)** – ускорения Кориолиса в нашей версии по формуле (6.8);
6. ***a*(абс)геом. с учетом *a*кк** – график абсолютного ускорения как геометрической суммы (*a*кк) и (*a*цт);
7. ***a*(абс)геом. с учетом *a*к** – график абсолютного ускорения как геометрической суммы (*a*к) и (*a*цт).

Исходные данные:

Rн = 0 м – радиус вращения начальный;

ω = 2 рад/с – угловая скорость вращения;
Vр = 50м/с – радиальная скорость тела.

Графики построим для радиального движения, проходящего через центр переносного вращения в интервале времени ≈2,5с (см. Рис.6.4) и ≈10с (см. Рис. 6.5) с дискретностью $\Delta t = 0{,}025$ с.

Абсолютное ускорение рассматриваемого движения геометрически складывается из центростремительного ускорения переносного вращения (ускорение переносного вращения в точке, в которой в данный момент времени находится тело) и ускорения Кориолиса. Центростремительное ускорение переносного вращения прямо пропорционально радиусу переносного вращения. При стремлении радиуса переносного вращения к нулю центростремительное ускорение также стремится к нулю. В то время как ускорение Кориолиса, пропорциональное угловой скорости переносного вращения и радиальной скорости относительного движения, не зависит от радиуса переносного вращения. Следовательно, при стремлении радиуса переносного вращения к нулю, абсолютное ускорение при равномерном радиальном относительном движении стремиться к величине ускорения Кориолиса по первому варианту, которое, таким образом, является минимумом функции абсолютного ускорения от расстояния до центра вращения

Классическое ускорение Кориолиса (*а*кк) при заданных параметрах движения равно 200 (м/с). Ускорение Кориолиса (*а*к) в нашей версии, вычисленное тремя различными способами по формулам (3.8), (3.12) и (6.6) при заданных параметрах движения равно 100 (м/с). На графиках (Рис.6.4;6.5) видно, что в центре вращения **классическое абсолютное ускорение** (*а(*абс)Ж) практически равно **классическому** ускорению Кориолиса, в то время как величина **абсолютного ускорения**, **вычисленная через годограф** линейной скорости (*а(*абс)Г) в центре вращения равна величине ускорения Кориолиса **в нашей версии**.

Таким образом, минимум функции абсолютного ускорения, вычисленного по методу годографа, который мы выбрали в качестве контрольного метода, подтверждает нашу версию ускорения Кориолиса. Нет ничего удивительного, что классический метод определения абсолютного ускорения по формуле (6.2) подтверждает «правильность» классического ускорения Кориолиса. Классическое абсолютное ускорение по формуле (6.2) и абсолютное ускорение, вычисленное через годограф абсолютной скорости по формуле (6.7), на наш взгляд, как раз и отличаются друг от друга только величиной ускорения Кориолиса в различных версиях в их составе. Это подтверждается ещё одним независимым классическим геометрическим методом определения абсолютного ускорения с учётом классической и нашей версии ускорения Кориолиса.

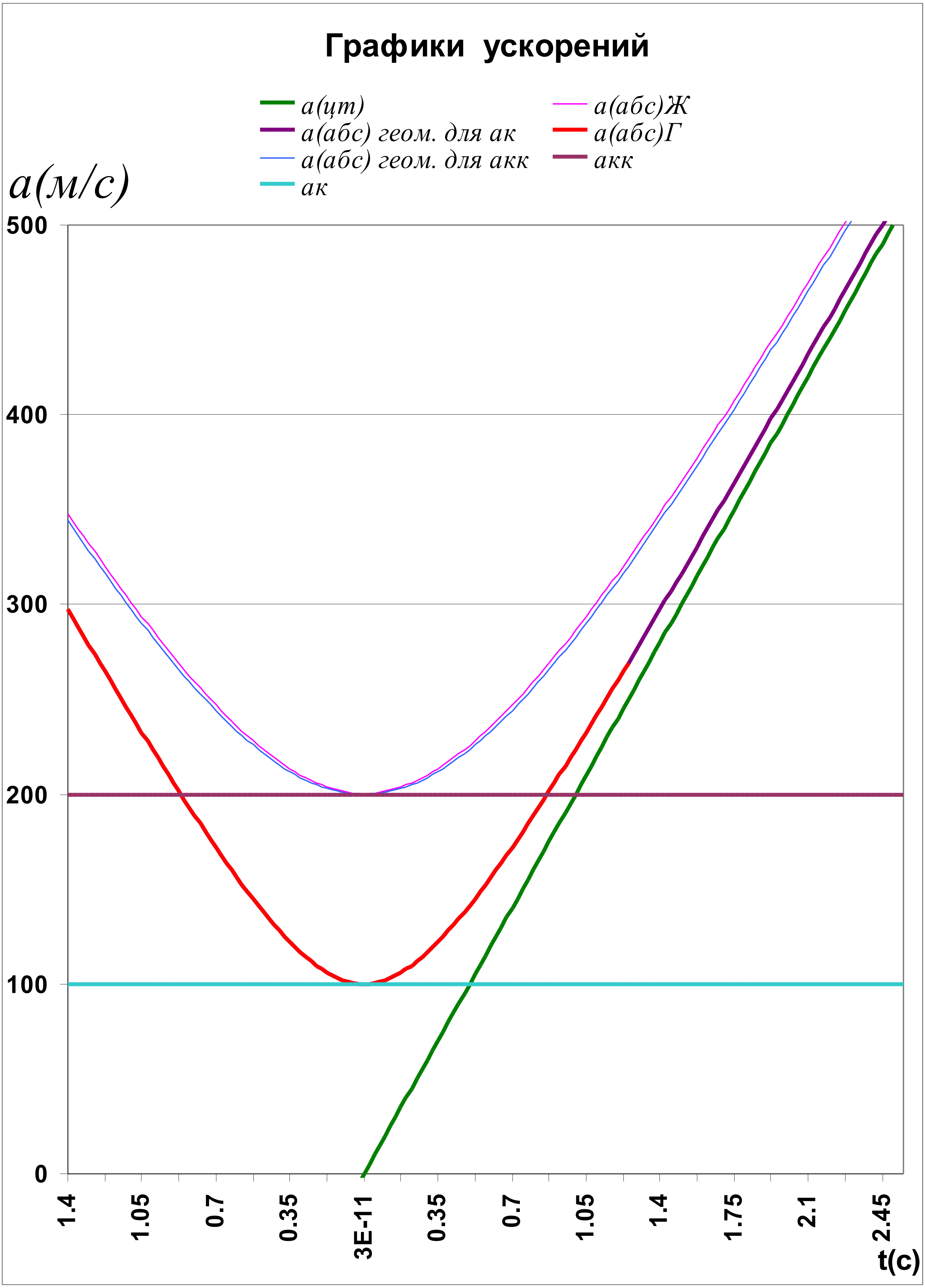
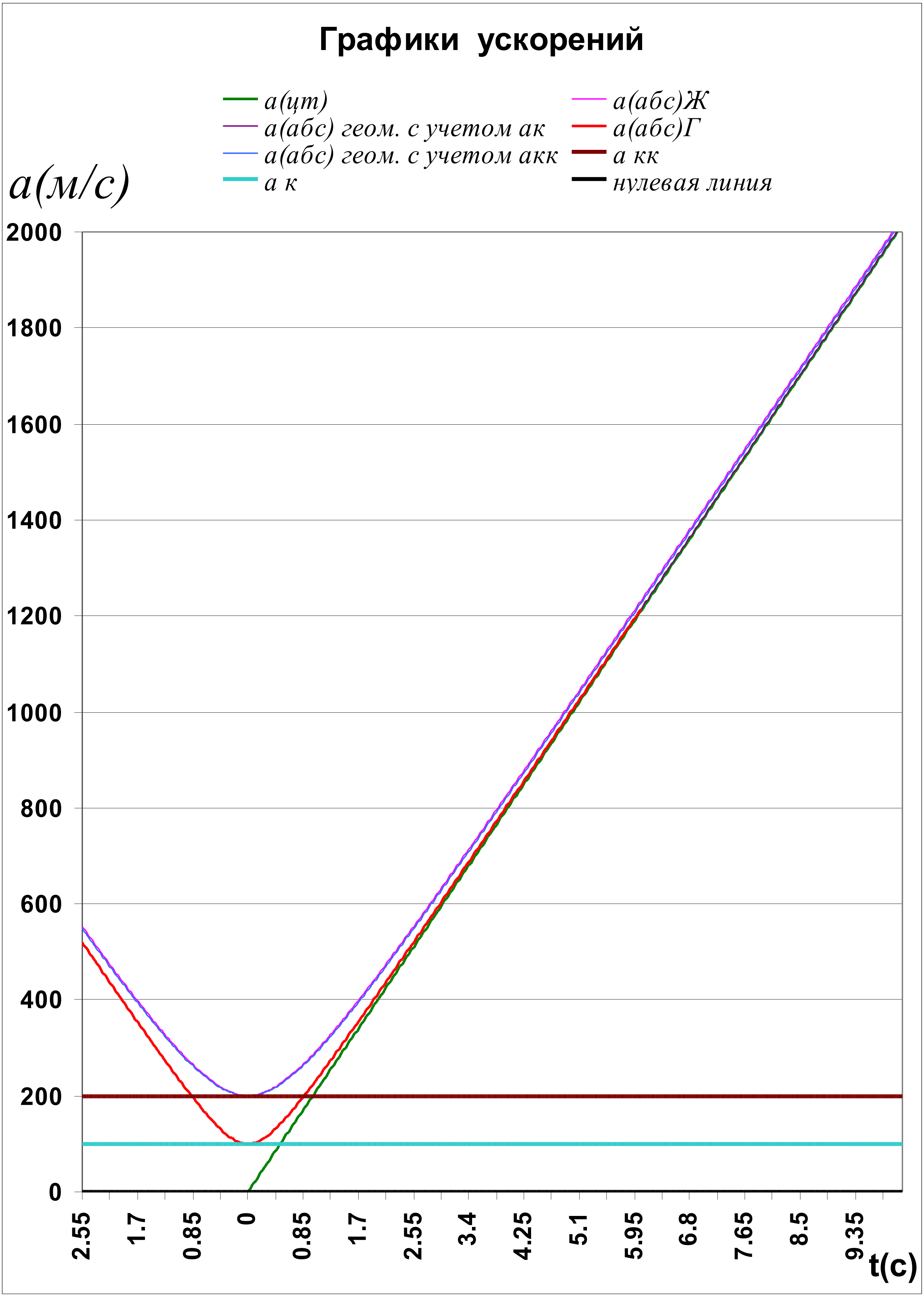

Графики ускорений
a(цт)
a(абс) геом. для ак
a(абс) геом. для акк
ак
a(абс)Ж
a(абс)Г
акк
a(м/с)
500
400
300
200
100
0
1.4
1.05
0.7
0.35
3E-11
0.35
0.7
1.05
1.4
1.75
2.1
2.45
t(c)

Рис. 6.4



Графики ускорений
a(цт)
a(абс) геом. с учетом ак
a(абс) геом. с учетом акк
a к
a(абс)Ж
a(абс)Г
a кк
нулевая линия
a(м/с)
2000
1800
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
2.55
1.7
0.85
0
0.85
1.7
2.55
3.4
4.25
5.1
5.95
6.8
7.65
8.5
9.35
t(c)

Рис. 6.5

Абсолютное ускорение является геометрической суммой текущего центростремительного ускорения переносного вращения и ускорения Кориолиса, которые действуют во взаимно-перпендикулярных направлениях. Поэтому абсолютное ускорение (*а(*абс)геом.) можно определить по теореме Пифагора как гипотенузу прямоугольного треугольника, которая равна корню квадратному из суммы квадратов катетов: центростремительного ускорения соответствующей точки вращающейся системы и ускорения Кориолиса:

$$a(\text{абс})\text{геом.} = \sqrt{a^2\text{цт} + a^2\text{к}} \qquad (6.9)$$

Подставляя в формулу (6.9) ускорение Кориолиса классическое (*а*кк) и ускорение Кориолиса в нашей версии (*а*к) определим два варианта абсолютного ускорения и построим графики этих абсолютных ускорений (*а(*абс)геом. с учетом *а*кк) и (*а(*абс)геом. с учетом *а*к). График абсолютного ускорения с учётом ускорения Кориолиса в нашей версии (*а(*абс)геом. с учетом *а*к), изображённый фиолетовым цветом на (Рис.6.4) и (Рис.6.5) практически сливается с графиком абсолютного ускорения, вычисленного через годограф (*а(*абс)Г), изображённым красным цветом. То есть геометрический метод с учётом ускорения Кориолиса в нашей версии и метод определения абсолютного ускорения через годограф абсолютной скорости дают одинаковый результат. Чтобы показать присутствие обоих графиков, график (*а(*абс)Г) построен для меньшего количества значений абсолютного ускорения, чем график (*а(*абс)геом. с учетом *а*к), так, что график (*а(*абс)Г) закрывает только часть графика (*а(*абс)геом. с учетом *а*к). При этом визуально один из графиков абсолютного ускорения является как бы продолжением другого, т.е. оба графика сливаются в единый график (см. Рис.6.4;6.5).

Графики (*а(*абс)Ж) и (*а(*абс)геом. с учетом *а*кк) сходятся не так точно как графики (*а(*абс)Г) и (*а(*абс)геом. с учетом *а*к) при той же дискретности дифференцирования и представлены на Рис. 6.4;6.5 двумя разными кривыми, имеющими хотя и небольшую, но хорошо заметную разницу между ними. Тем не менее, абсолютное ускорение, найденное по формуле (6.9) с учётом классического ускорения Кориолиса (*а*кк), в целом с достаточной точностью подтверждает классическую формулу определения абсолютного ускорения методом дифференцирования приращения абсолютной траектории (6.2).

Таким образом, величина абсолютного ускорения, полученная геометрическим методом по классической формуле (6.9) при прочих равных параметрах зависит от величины ускорения Кориолиса, подставляемого в формулу (6.9). Абсолютное ускорение по формуле (6.9) в зависимости от версии подставляемого в неё ускорения Кориолиса принимает значение то абсолютного ускорения по формуле (6.2), то абсолютного ускорения по формуле (6.7). Следовательно, отличие абсолютного ускорения (*а(*абс)Ж), полученного при двойном дифференцировании приращения абсолютной траектории по формуле (6.2) или (6.4) от абсолютного ускорения, определённого по методу годографа по формуле (6.7), как мы и ожидали, объясняется только разницей величины ускорения Кориолиса в их составе.

Совпадение ускорения Кориолиса в той или иной версии со значением абсолютного ускорения в центре переносного вращения может служить критерием истинности определения ускорения Кориолиса и абсолютного ускорения только в том случае, если ускорение Кориолиса и абсолютное ускорение определяются по независимым друг от друга методикам. Только в этом случае абсолютное и поворотное ускорения могут служить взаимным подтверждением друг друга количественно и взаимным подтверждением правильности методик, по которым они определяются. Этому условию удовлетворяют только поворотное ускорение в нашей версии и поворотное и абсолютное ускорения, найденные через годограф абсолютной скорости в центре переносного вращения, т.к. значения этих ускорений, найденные по независимым методикам, совпадают. То есть поворотное ускорение Кориолиса в нашей версии и есть искомое поворотное ускорение Кориолиса.

На первый взгляд абсолютное ускорение в центре переносного вращения в каждом из этих методов не может быть критерием истинности для ускорения Кориолиса, т.к. величина поворотного ускорения в каждом методе определяется по одной и той же методике, что и абсолютное ускорение в целом. Однако это не совсем так и касается только составляющих абсолютного ускорения по формулам (6.2;6.4). При определении абсолютного ускорения в соответствии с формулами (6.2;6.4) дифференцируется как поступательное движение, так и поворотное движение, т.е. для каждого составляющего вида движения, входящего в состав абсолютного движения используется своя методика определения приращения этого вида движения. В методе же определения абсолютного ускорения через годограф абсолютной скорости дифференцируется **абсолютная** величина годографа, что эквивалентно дифференцированию приращения прямолинейного (поступательного) движения. Таким образом, поворотное ускорение в составе абсолютного ускорения в последнем методе не связано с классической моделью дифференцирования поворотного движения.

В соответствии с классической моделью сложного движения любое движение в общем случае может быть представлено в виде одного поступательного и одного вращательного движения. Определение приращения поступательного движения достаточно несложно и не вызывает вопросов к классической физике, а вот классическое определение приращения поворотного движения, на наш взгляд, осуществляется в классической физике некорректно. Приращение поворотного движения определяется при переменных координатах абсолютной системы координат в предположении, что во время поворотного движения текущие координаты движущегося тела в подвижной системе координат остаются неизменными, а изменение относительных координат происходит при постоянных абсолютных координатах. При этом принципиально искажается физический смысл поворотного движения (см. выше, Глава3;5), т.к. фактически во-первых, оба движения осуществляются одновременно, а во-вторых, радиус поворотного движения непрерывно изменяется.

На наш взгляд, классическое поворотное ускорение, которое определяется в составе абсолютного ускорения по формулам (6.2;6.4), зависит от субъективной классической модели поворотного движения. В классической физике не существует нескольких версий ускорения Кориолиса, а классическая формула ускорения Кориолиса уже более двухсот лет не подвергается сомнению. Однако отличие минимальных значений абсолютных ускорений в центре переносного вращения, найденных различными методами и представляющих собой с физической точки зрения поворотное ускорение Кориолиса **позволяет усомниться в исключительности и правильности классической версии ускорения Кориолиса**.

В методе определения абсолютного ускорения через годограф абсолютной скорости отсутствуют какие-либо искусственные допущения классической модели поворотного движения. Годограф скорости учитывает реальное изменение скорости в любой момент времени независимо от того связано ли это изменение с поступательным движением или с вращательным движением. Каждая точка годографа соответствует реальному вектору скорости, как по величине, так и по направлению, а совокупность всех его точек эквивалентна изменению **абсолютной величины** скорости при любом виде движения. Годограф скорости в общем случае криволинейного движения по своему физическому смыслу ничем не отличается от годографа скорости прямолинейного движения. И в том и в другом случае приращение скорости связано с преобразованием скорости по абсолютной величине (см. выше Глава1), поэтому дифференцирование годографа эквивалентно дифференцированию приращения скорости прямолинейного движения, в котором отсутствует поворотное движение.

При дифференцировании годографа осуществляется чисто математическая операция дифференцирования не связанная с какими-либо физическими моделями того или иного вида движения. Единственное теоретическое допущение в методе определения абсолютного ускорения через годограф скорости связано с представлением кривой годографа в виде ломаной линии (Рис.6.3), что вносит некоторую количественную погрешность при определении абсолютной величины длины годографа. Однако такая погрешность с физической точки зрения непринципиальна, т.к. не искажает физической сущности годографа в соответствии, с которой приращением скорости движения является именно абсолютная величина годографа. Погрешность, связанная с линеаризацией криволинейного движения легко устраняется при дифференцировании с уменьшением дискретности дифференцирования.

Проведём подобный анализ для общего случая проявления ускорения Кориолиса. Точно также как и для ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении определим абсолютное ускорение сложного движения, в котором присутствует радиальная и нормальная составляющая относительного движения двумя классическими методами: через годограф абсолютной скорости и классическим геометрическим методом. Для простоты рассмотрим сложное движение, в котором равномерное и прямолинейное относительное движение направлено под углом в 45^0 к радиусу переносного вращения.

1. Определим абсолютное ускорение рассматриваемого движения через годограф абсолютной скорости.

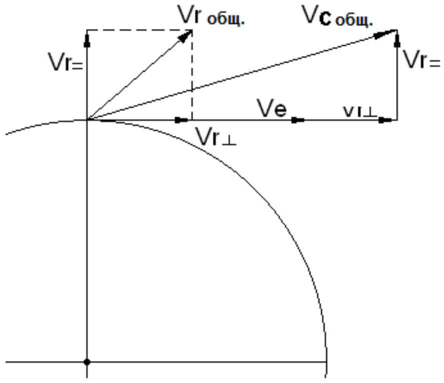


Рис. 6.6

Физический механизм определения абсолютного ускорения рассматриваемого движения аналогичен механизму определения абсолютного ускорения при радиальном относительном движении по формуле (6.7), т.е. через годограф абсолютной скорости (см. Рис 6.3). Однако вместо абсолютной скорости при радиальном относительном движении (Vc) в формулу (6.7) следует подставлять абсолютную скорость (Vc общ.), определённую с учётом нормальной составляющей относительной скорости (Vr общ.). Кроме того, за счёт нормальной составляющей относительной скорости (Vr общ.) вектор абсолютной скорости (V(абс)общ) в рассматриваемом движении вращается не с угловой скоростью переносного вращения, а с угловой скоростью абсолютного вращения текущей (Ωn), которая равна сумме угловых скоростей переносного движения текущего (ωет) и угловой скорости текущей относительного движения, обусловленного перпендикулярной к радиусу составляющей относительного движения (ωrт):

$\Omega(n) = \omega е т + \omega r т$

Абсолютную линейную скорость спирали (Vc общ) определим в соответствии с рисунком 6.6:

$$Vc\ общ. = \sqrt{(Vr_{\perp} + Ve)^2 + V^2 r_{=}}$$

С учётом оговоренных поправок перепишем формулу (6.7) применительно к абсолютному ускорению (***a*(абс)общГ)** при относительном движении, направленном под углом 45^0 к радиусу переносного вращения:

$$\boldsymbol{a(абс)общГ = (\sqrt{((Vcобщ(t_1) - Vобщ(t))*\Delta t)^2 + (Vcобщ(t)*\Omega абс*\Delta t)^2})/\Delta t} \qquad \textbf{(6.10)}$$

2. Определим абсолютное ускорение классическим геометрическим методом по формуле (6.9) при относительном движении, направленном под углом 45^0 к радиусу:

2.1. Абсолютное ускорение в каждой точке текущего радиуса вращения без учёта ускорения Кориолиса, проявляющегося за счёт относительного движения с радиальной составляющей ($Vr_{=}$) относительной скорости (Vrобщ), представляет собой центростремительное ускорение текущее:

$$\boldsymbol{a цт\ тек = \Omega(n)^2 * Rт\ общ} \qquad \textbf{(6.11)}$$

Перпендикулярно центростремительному ускорению текущему (*a*цттек) действует ускорение Кориолиса, обусловленное радиальной составляющей скорости относительного движения. Поскольку переносная угловая скорость за счёт нормального к радиусу относительного движения непрерывно изменяется, то в каждом минимальном интервале времени дифференцирования необходимо учитывать текущую абсолютную угловую скорость (Ωn=ωет+ωrт). Тогда абсолютное ускорение геометрическое с учётом ускорения Кориолиса в нашей версии будет иметь вид:

$$\boldsymbol{a(абс)общ.\ геом = \sqrt{(\Omega n^2 * Rт\ общ)^2 + (\Omega n * Vr_{=})^2}} \qquad \textbf{(6.12)}$$

2.2. Определим абсолютное ускорение геометрическое с учётом классического полного ускорения Кориолиса при относительном движении, направленном под углом 45^0 к радиусу.

Каждому значению текущего радиуса переносного вращения при наличии нормального к радиусу относительного движения соответствует абсолютная текущая переносная угловая скорость (**Ωn=**ωет+ωrт), которая является абсолютной угловой скоростью в текущем интервале времени дифференцирования. Для ускорения Кориолиса, обусловленного перпендикулярной к радиусу составляющей относительной скорости необходимо учитывать угловую скорость переносную текущую (ωет) или абсолютную угловую скорость на (n-1) шаге дифференцирования. Следовательно, для определения полного ускорения Кориолиса при произвольном направлении относительного движения в классической модели поворотного движения необходимо воспользоваться формулой (3.25*).

$$a кк\ общ. = 2*\Omega(n)*Vr_{=} + 2*\Omega(n-1)*Vr_{\perp} \qquad (3..25*)$$

где:

$Vr_{=}$: радиальная составляющая относительной скорости;

$Vr_{\perp}$: перпендикулярная составляющая относительной скорости;

Ω(n): переносная угловая скорость на текущем радиусе, которая для радиального относительного движения является абсолютной;

Ω(n-1) = ωет: переносная угловая скорость на (n-1) шаге дифференцирования радиального относительного движения;

Запишем формулу (3.25*) в алгебраическом виде, в котором дополнительное ускорение определяется, как корень квадратный из суммы квадратов катетов ($2*\Omega(n)*Vr_{=}$) и ($2*\Omega(n-1)*Vr_{\perp}$), поскольку составляющие ускорения Кориолиса, проявляющиеся при радиальном относительном движении и при нормальном к радиусу относительном движении, взаимно перпендикулярны:

$$a\text{кк общ.} = \sqrt{(2*\Omega n*Vr_{=})^2 + (2*\Omega(n-1)*Vr_{\perp})^2} \qquad (6.13)$$

Подставляя в формулу (6.9) выражения (6.11) и (6.13), получим окончательно:

$$\boldsymbol{a(\text{абс})\text{общКгеом}} = \sqrt{(\Omega^2 n\ \text{общ.}*R\text{т общ})^2+(2*\Omega n*Vr_{=})^2 + (2*\Omega(n-1)*Vr_{\perp})^2} \qquad \mathbf{(6.14)}$$

Напомним, что в нашей версии полное ускорение Кориолиса при произвольном направлении относительного движения с учетом абсолютной текущей угловой скорости определяется по формуле:

aк общ. $= \Omega n*Vr_{=}$ (6.15)

Используя полученные формулы, построим графики:

1. **(*а*цт)** – график центростремительного ускорения вращательного движения с текущим физическим радиусом (абсолютное ускорение без учёта ускорения Кориолиса за счёт радиальной составляющей относительной скорости по формуле (6.11);
2. ***а(*абс)общК** – график абсолютного ускорения, рассчитанного классическим способом по формуле (6.15);
3. ***а(*абс)общ** – график абсолютного ускорения, рассчитанного классическим способом по формуле (6.12);
4. ***а(*абс)общГ** – график абсолютного ускорения, определенного через годограф абсолютной скорости по формуле (6.10);
5. ***а*(к)общ** – график ускорения Кориолиса в нашей версии по формуле (6.15): aк общ. $= \Omega*Vr_{=}$;
6. ***а(*кк)общ** – график классического ускорения Кориолиса (66.7);

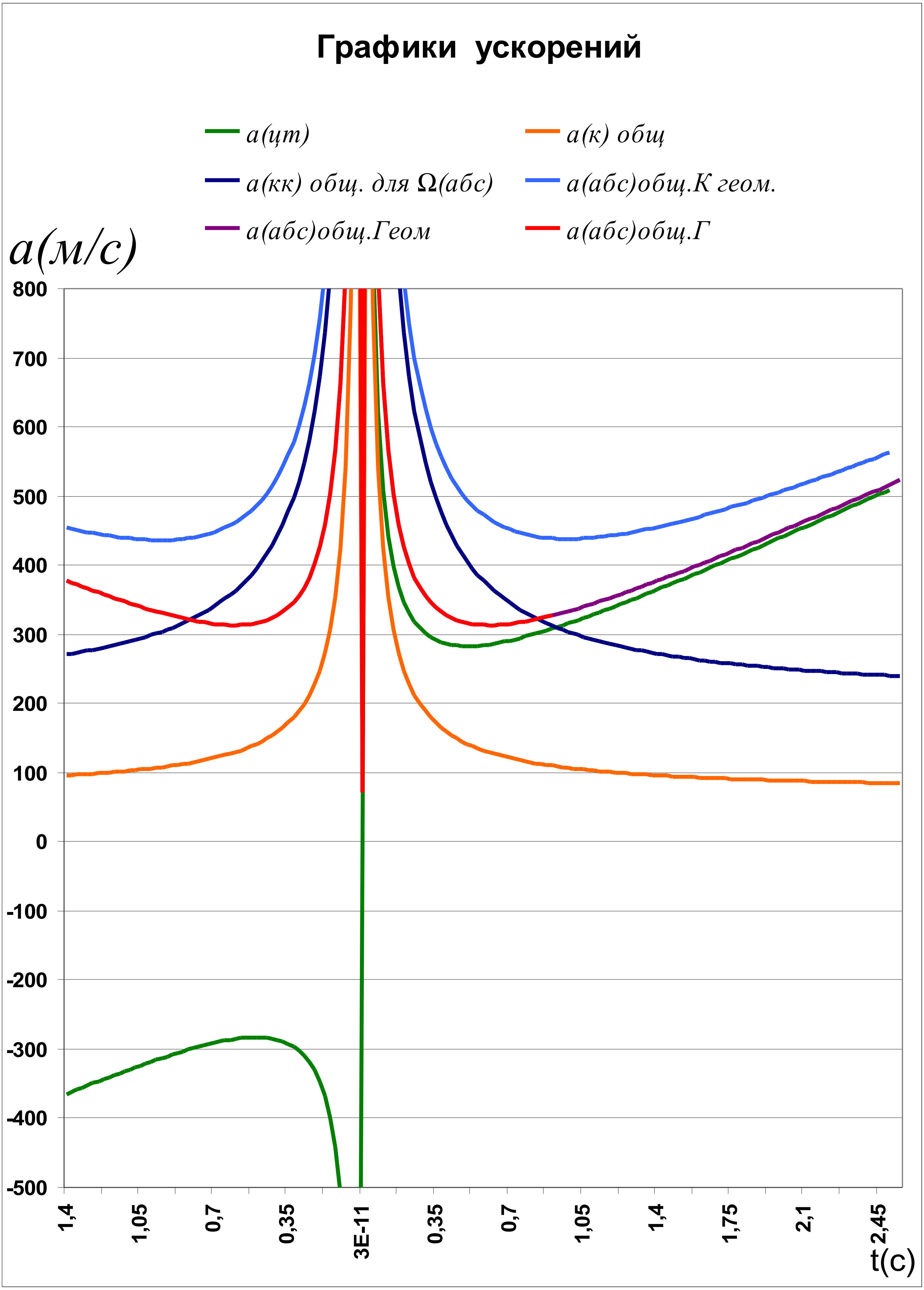
Исходные данные практически те же, что и в предыдущем случае с некоторыми оговорками и дополнениями:

Rн = 0 м – радиус вращения начальный;
Ωабс.= ωе + ωr$_т$ – угловая скорость абсолютного движения;
Vr общ. = 50м/с – относительная скорость тела в относительном движении произвольного направления.

Графики построим для относительного движения как в области, расположенной вблизи центра вращения, так и в областях отдалённых от центра вращения в интервале времени ≈2,5с (см. Рис.6.7) и ≈10с (см. Рис. 6.8) с дискретностью Δt = 0,025 с.

Резкое уменьшение радиуса переносного вращения в области близкой к центру вращения при неизменной нормальной к радиусу составляющей относительной скорости приводит к резкому увеличению относительной угловой скорости, а, следовательно, и абсолютной угловой скорости, что в свою очередь приводит к увеличению абсолютного ускорения. Поэтому в области, лежащей вблизи центра переносного вращения, графики абсолютного ускорения устремляются в бесконечность. Однако, как и в случае радиального относительного движения, в точке соответствующей центру вращения абсолютное ускорение в обеих версиях соответствует ускорению Кориолиса в одноимённых версиях.

В нашем примере ускорение Кориолиса для радиального относительного движения в нашей версии, удовлетворяющее исходным данным равно 70,7 *м/с*. На Рис. (6.7) видно, что абсолютное ускорение (*а*(абс)общ.Г) и (*а*(абс)общ.геом.) в точке соответствующей центру переносного вращения имеет минимальное значение, равное ускорению Кориолиса, обусловленного радиальной составляющей относительного движения в нашей версии, т.е. 70,7 *м/с*. График абсолютного ускорения классического геометрического (*а*(абс)общ.Кгеом.) имеет минимальное значение в точке центра вращения равное 141,42 *м/с,* что соответствует классической версии ускорения Кориолиса по первому варианту. Причём если в центре переносного вращения абсолютное ускорение определяется величиной ускорения Кориолиса, то с увеличением радиуса вращения абсолютное ускорение определяется в основном центростремительным ускорением переносного вращения. На Рис.6.5; 6.8 уже через 10 секунд радиального движения все кривые практически сливаются с графиком центростремительного ускорения.



Графики ускорений
a(цт)
a(к) общ
a(кк) общ. для Ω(абс)
a(абс)общ.К геом.
a(абс)общ.Геом
a(абс)общ.Г
a(м/с)
800
700
600
500
400
300
200
100
0
-100
-200
-300
-400
-500
1,4
1,05
0,7
0,35
3E-11
0,35
0,7
1,05
1,4
1,75
2,1
2,45
t(c)

Рис.6.7

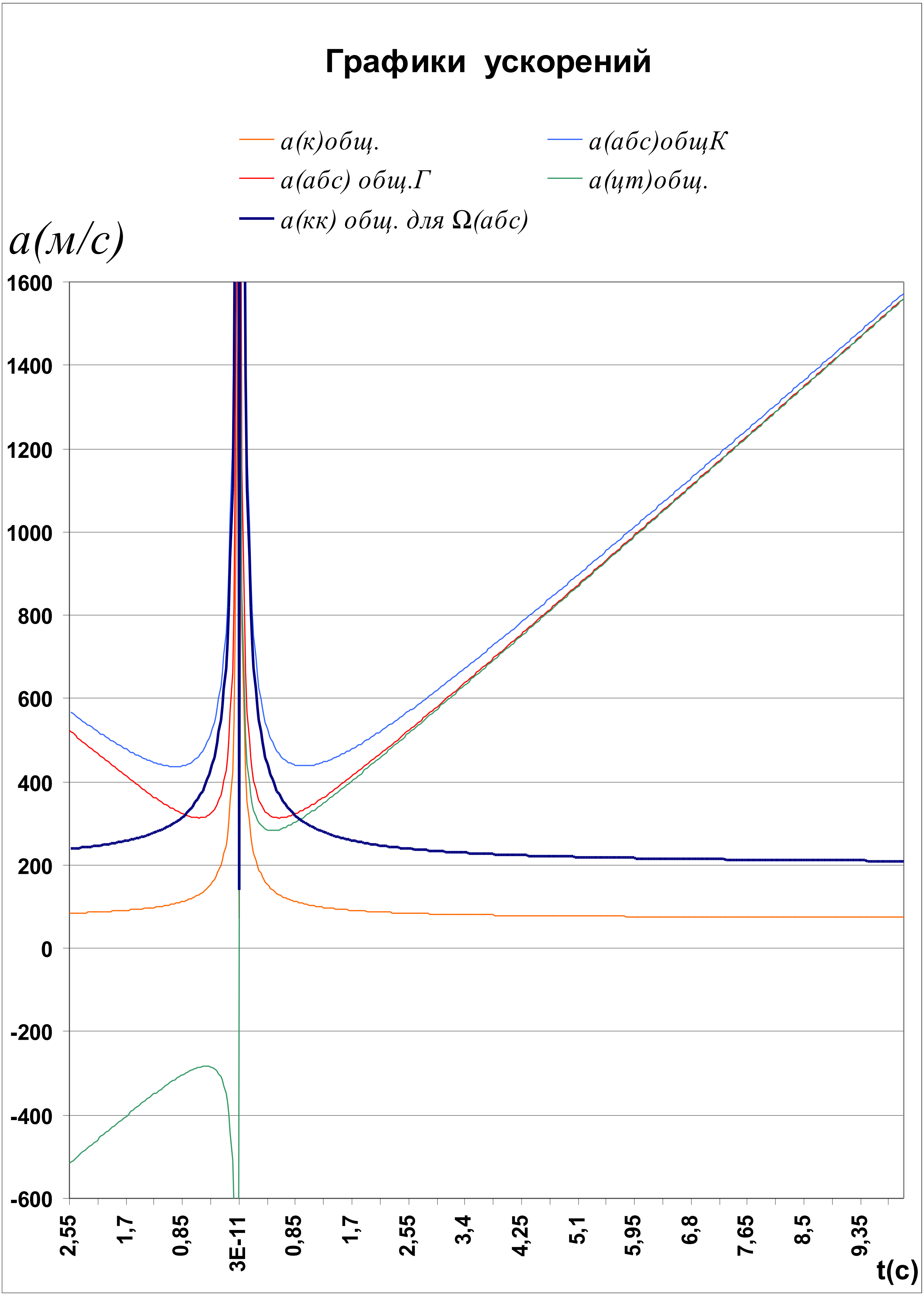

Графики ускорений
а(к)общ.
а(абс)общК
а(абс) общ.Г
а(цт)общ.
а(кк) общ. для Ω(абс)
а(м/с)
1600
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
-200
-400
-600
2,55
1,7
0,85
3E-11
0,85
1,7
2,55
3,4
4,25
5,1
5,95
6,8
7,65
8,5
9,35
t(c)

Рис.6.8

Как видно из рисунка 6.7 и 6.8 абсолютное ускорение, рассчитанное по формуле (6.14) с учётом классического ускорения Кориолиса **значительно** превышает абсолютное ускорение, рассчитанное по формуле (6.12) с учётом нашей версии ускорения Кориолиса, а также текущее переносное ускорение. Причем это наблюдается даже в областях достаточно удаленных от центра вращения, где переносная угловая скорость текущая меняется незначительно. Это косвенно подтверждает нашу версию ускорения Кориолиса, в соответствии с которой дополнительное ускорение при нормальном к радиусу относительном движении не является ускорением Кориолиса, а входит в состав переносного ускорения вращательного движения. В классической версии ***дополнительное ускорение,*** которое фактически является частью переносного ускорения, рассматривается как ускорение Кориолиса, поэтому в классической версии сложного движения при наличии относительного движения, перпендикулярного радиусу ***дополнительное ускорение учитывается дважды***: один раз в составе переносного ускорения и второй раз в составе абсолютного ускорения, как ускорение Кориолиса.

Несовпадение графика абсолютного ускорения по методу годографа абсолютной скорости (формула 6.10) с графиком абсолютного ускорения по формуле (6.9) с учётом классического ускорения Кориолиса (формула 6.14), точно так же как несовпадение графиков абсолютных ускорений в разных версиях при радиальном относительном движении (Рис.6.4;6.5;6.7;6,8) выявляет противоречие между теоремой Жуковского: *«Скорость соответственной точки годографа равна полному ускорению точки, движущейся по траектории»* и его же теоремой *«О сложении ускорений»*, а также теоремой Кориолиса. С одной стороны по Жуковскому полное ускорение любой движущейся точки равно скорости соответственной точки годографа. Однако с другой стороны ускорение Кориолиса, вытекающее из его теоремы о сложении скоростей и его же аналитического вывода ускорения Кориолиса, не соответствует ускорению Кориолиса, как минимума абсолютного ускорения, в центре переносного вращения, вычисленного через годограф абсолютной скорости.

Классические методы определения абсолютного ускорения по формулам (6.7;6.10) противоречат классическим методам определения абсолютного ускорения по формуле (6.9) только при подстановке в формулу (6.9) классического выражения для ускорения Кориолиса. Следовательно, классические методы определения абсолютного ускорения по формулам (6.7;6.10) противоречат не классическому методу определения абсолютного ускорения по формуле (6.9), а классическому ускорению Кориолиса и классической модели поворотного движения.

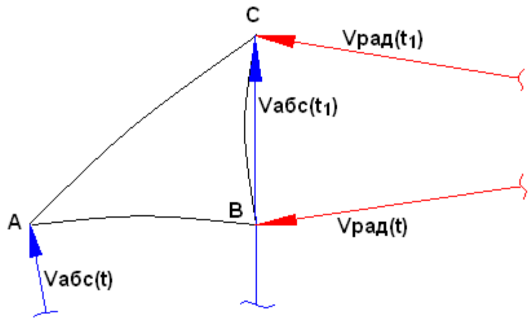


Рис.6.10

На рисунке 6.10 графически показано, каким образом приращение абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного вращения (BC) может одновременно являться приращением скорости радиального относительного движения по направлению (BC). Годограф абсолютной скорости (AC) разложен на два взаимно перпендикулярных направления. Изменение абсолютной скорости в направлении линейной скорости переносного движения (годограф BC) одновременно приводит к изменению радиальной скорости относительного движения по направлению. Таким образом, под действием ускорения Кориолиса обе скорости получают одно и то же приращение в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

7. УСКОРЕНИЕ КОРИОЛИСА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ЧЕРЕЗ ЦЕНТР ВРАЩЕНИЯ.

При переходе через центр вращения ускорение Кориолиса, проявляющееся при радиальном относительном движении и отсутствии нормальной к радиусу составляющей относительной скорости в неинерциальной системе отсчёта, которая связана с точкой, движущейся по абсолютной траектории, не изменяет ни величины, ни направления действия по отношению к движущейся вдоль радиуса точке. При постоянных параметрах относительного и переносного движения ускорение Кориолиса, обусловленное радиальным относительным движением постоянно на любом расстоянии от центра вращения. Для того чтобы наглядно проиллюстрировать независимость направления действия силы и ускорения Кориолиса на движущееся радиально тело от расстояния до центра вращения в неинерциальной системе отсчёта, рассмотрим три последовательных положения тела, движущегося в радиальном направлении на вращающемся диске. На Рис. 7.1 видно, что в неинерциальной системе координат сила Кориолиса, действующая на тело со стороны направляющей, не изменяет направления по отношению к телу.

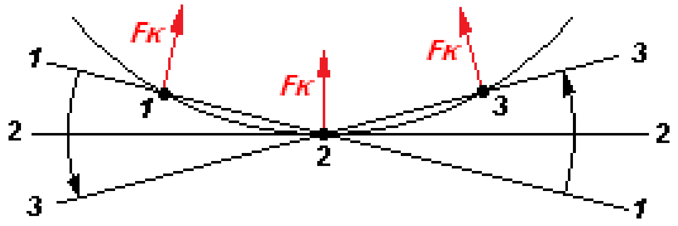


Рис.7.1

Конечно, в инерциальной абсолютной системе отсчёта ускорение Кориолиса при радиальном относительном движении изменяет своё направление в процессе вращательного движения, как и любое ускорение во вращательном движении. Однако изменение направления ускорения Кориолиса происходит равномерно в соответствии с изменением фазы вращательного движения. Процесс изменения направления ускорения Кориолиса при радиальном относительном движении в точке центра вращения ничем не отличается от процесса изменения направления ускорения Кориолиса в любой другой точке траектории движения. Резкого изменения направления ускорения Кориолиса на 180^0, означающего смену знака физической величины в любой системе отсчёта, не происходит ни в одной точке траектории движения тела при радиальном относительном движении. В то время как переносное ускорение при переходе через центр вращения изменяет знак на противоположный.

В общем случае при произвольном направлении относительного движения присутствуют обе составляющие относительной скорости. Поскольку радиус переносного вращения при движении к центру непрерывно уменьшается, а линейная относительная скорость при этом остаётся неизменной, то в области близкой к центру вращения резко возрастает относительная угловая скорость. Увеличение относительной угловой скорости приводит к увеличению общей угловой скорости абсолютного движения и как следствие к увеличению относительного и абсолютного ускорений. Кроме того, с увеличением абсолютной угловой скорости увеличивается и ускорение Кориолиса по первому варианту, т.к. радиальная составляющая относительной скорости вращается с абсолютной угловой скоростью.

На графиках, изображённых на Рис (6.7;6.8) при приближении к центру вращения за счёт нормальной к радиусу составляющей относительной скорости относительное ускорение, абсолютное ускорение и ускорение Кориолиса по первому варианту возрастают до бесконечности. На практике увеличение ускорений, конечно же, не достигает бесконечной величины. Бесконечность это понятие философско-математическое. Реальные тела имеют конечные геометрические размеры. Радиус относительного вращения не может быть меньше радиуса тела, если для простоты предположить, что тело имеет форму шара, что ограничивает рост относительной угловой скорости. Тем не менее, тело, движущееся с относительной скоростью произвольного направления в сторону центра вращения при наличии радиальной и нормальной к радиусу составляющей относительного движения вблизи центра вращения, действительно может испытывать резкое увеличение абсолютного ускорения подобно резкому увеличению ускорения, испытываемому телом при встрече с неподвижным препятствием.

Резкое увеличение угловой скорости вблизи центра вращения означает увеличение инерционного сопротивления прямолинейному движению в процессе преобразования его во вращательное движение. Следовательно, поддержание вращательного движения в таких условиях в конечном итоге требует резкого увеличения центростремительного ускорения в абсолютной системе координат, а значит и абсолютного ускорения в целом. Однако это не является спецификой исключительно вращательного движения в условиях относительного движения в сторону центра вращения, имеющего радиальную и тангенциальную составляющие. Любое тело, движущееся с большой скоростью в произвольном направлении и с произвольным ускорением при встрече с неподвижным препятствием, оказывающим большое сопротивление движению, испытывает большое ускорение, которое может привести к разрушению тела.

Переход через центр переносного вращения можно смоделировать следующим образом. Тело, находящееся на радиальной направляющей движется по внутренней поверхности сжимающейся сферы в одном направлении со сферой, которая совершает переносное вращение. Для того чтобы тело достигло центра переносного вращения, сфера должна сжаться в точку. При этом происходит резкое увеличение ускорения, связанное с увеличением относительной угловой скорости, а также с увеличением сопротивления движению в направлении перпендикулярном радиусу непосредственно в точке центра вращения вплоть до полной остановки тела в центре вращения в этом направлении. Сопротивление линейному движению в направлении перпендикулярном радиусу в центре вращения эквивалентно сопротивлению, испытываемому телом при встрече с неподвижным препятствием в направлении перпендикулярном направлению движения.

Для смены знака ускорений переносного и относительного вращательного движений при переходе через нуль телу необходимо сообщить нормальное к радиусу относительное движение в обратном направлении и продолжить радиальное движение тела в прежнем направлении, что эквивалентно отражению тела от отражающей поверхности. Таким образом, при переходе через нуль происходит обычное отражение тела от центра вращения. При этом после отражения тело вновь получает абсолютное ускорение, равное по величине абсолютному ускорению до отражения, но нормальная к радиусу составляющая отражённого движения имеет противоположный знак. Следовательно, ускорения переносного и относительного вращательного движений при переходе через центр вращения изменяют знак на противоположный. При этом ускорение Кориолиса по первому варианту в центре вращения не уменьшается до нуля, т.к. при отражении скорость движения вдоль отражающей поверхности остаётся неизменной, а угловая скорость вращения радиальной составляющей вектора скорости относительного движения в центре вращения не равна нулю.

Существует иллюзия, что в центре вращения угловая скорость радиальной составляющей вектора скорости относительного движения равна нулю, однако уменьшение до нуля угловой скорости в центре вращения относится только к математической точке, не имеющей геометрических размеров. Переход физического тела через центр вращения, как бы ни были малы его размеры, не приводит изменению угловой скорости вектора радиальной составляющей относительного движения. Любая физическая величина переходит через нулевое значение только при смене знака физической величины. По отношению к угловой скорости смена знака означает изменение направления вращения. Поскольку при переходе через центр вращения радиально движущегося тела направление вращения системы не изменяется, то и смены знака угловой скорости вектора радиальной составляющей относительного движения не происходит. Следовательно, в центре вращения угловая скорость вектора радиального относительного движения не равна нулю. На всём протяжении радиального движения происходит равномерное изменение направления скорости радиального движения, в том числе и при пересечении центра переносного вращения.

В нашей модели при переходе через центр переносного вращения тела, движущегося по относительной траектории вместе с отражением тела от центра вращения должно произойти и отражение воображаемой сферы от центра вращения, которая после отражения должна расширяться. При этом радиальное движение в неизменном виде продолжится в направлении от центра вращения, а нормальная к радиусу составляющая относительного движения сменит знак на противоположный, то есть направление вектора линейной скорости всех вращательных движений поменяется на противоположное.

Полное ускорение в центре вращения по абсолютной величине равно ускорению Кориолиса по первому варианту, т.к. все составляющие абсолютного ускорения в центре вращения, кроме ускорения Кориолиса по первому варианту равны нулю. Следовательно, минимумом функции абсолютного ускорения от радиуса переносного вращения при произвольном направлении относительного движения является ускорение Кориолиса, обусловленное радиальным относительным движением. Таким образом, величина абсолютного ускорения и общего ускорения Кориолиса при переходе через центр вращения никогда не снижается до нулевого значения и не переходит через нуль, т.е. смены знака абсолютного ускорения и общего ускорения Кориолиса при переходе движущегося тела через центр вращения не происходит.

8. ОТКЛОНЕНИЕ СВОБОДНО ПАДАЮЩИХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ЗЕМЛИ.

Часто для подтверждения формулы ускорения Кориолиса необоснованно ссылаются на результаты экспериментов с бросанием тел с большой высоты, считая, что отклонение падающих тел происходит под действием силы Кориолиса. При этом ускорение Кориолиса находят исходя из измеренного линейного отклонения, что свидетельствует на наш взгляд о неправильном понимании природы ускорения Кориолиса.

Известен классический эксперимент, в котором на экваторе тело падает в шахту с высоты 80 метров и отклоняется при этом на **2,3 см** к востоку. *(Учебник физики Л.Д. Ландау, А.И. Китайгородского, Наука, 1974 г.).*

Исходные данные:

Радиусы $\mathbf{R_1 = 6380080}$ **м** и $\mathbf{R_2 = 6380000}$ **м.**
Время падения тела с высоты **80 м - 4 сек.**

Линейная скорость вращения Земли для указанных радиусов:

$V_{лс}$ = 463,7314815 м/сек и $V_{лб}$ = 463,7372963 м/сек соответственно.

Начальная радиальная скорость тела – **Vр = 0.**

Ускорение, вычисленное по классической формуле Кориолиса, с такими исходными данными дает результат:

$$a_к = 2 * \omega * Vр = \mathbf{2 * \overset{\omega}{(463{,}7372963/6380080)} * \overset{Vр}{(9{,}8*4/2)} = 0{,}00288\ м/с^2}$$

Если подставить полученный результат в формулу (3.10) для пути, пройденного с ускорением, то получим отклонение равное 2,3 см

$$\mathbf{S = a_{ко} * t^2 / 2 = 0{,}0028 * 4^2 / 2 = 0{,}023\ м = 2{,}3\ см}$$

Соответственно, зная отклонение, измеренное в эксперименте, можно из формулы (3.10) определить ускорение тела, с которым, как предполагается, двигалось тело. Оказывается, что это ускорение численно равно ускорению, найденному по классической формуле для ускорения Кориолиса:

$$a = 2 * S / t^2 = \mathbf{2 * 0{,}023 / 16 = 0{,}00288\ м/с^2}.$$

На первый взгляд это блестящее подтверждение теории на практике. Но вот только **ускорения Кориолиса в этом опыте нет!** Как уже отмечалось выше, ускорение Кориолиса это изменение абсолютной скорости радиально движущегося тела в составе вращающейся системы за счет непосредственного взаимодействия с вращающейся системой в направлении линейной скорости переносного вращения. Тело, брошенное в шахту, не имеет непосредственного контакта с вращающейся системой, которой является Земля, поэтому импульс движения падающего тела **не может** быть изменен за счет вращения Земли.

Отклонение к востоку тела, брошенного в шахту, происходит не под действием силы Кориолиса, а под действием инерции движения тела со скоростью равной по величине линейной (окружной) скорости тела до броска. Дно шахты, имеющее радиус вращения на 80 м меньше, чем радиус вращения тела до броска, имеет линейную скорость меньшую, чем линейная скорость тела. **За счет разницы скоростей тело, приближаясь ко дну шахты, одновременно движется вдоль его поперечника**, причем эта разница скоростей не изменяется во времени, т.е. какое-либо ускорение тела отсутствует.

Линейная скорость тела перед ударом о дно шахты по величине осталась такой же, как и перед броском. При этом можно пренебречь изменением скорости за счет сопротивления воздуха (как материального тела, движущегося вместе с Землей), скорость которого будет немного меньше у дна шахты. Таким образом, отклонение тела, брошенного в шахту, происходит не под действием силы и ускорения Кориолиса, а за счет разницы скоростей тела и дна шахты.

Сила Кориолиса – это, безусловно, проявление сил инерции. Но обратное утверждение неверно. Проявление сил инерции не всегда связано с проявлением силы Кориолиса.

Если тело бросить в шахту не посредине ствола шахты, а вдоль ее восточной стенки, которая при этом будет играть роль направляющей, то тело не отклонится от вертикали на 2,3 см. Его линейная скорость плавно уменьшится от значения, которое она имела в момент броска до значения линейной скорости дна шахты. В этом случае замедление будет происходить с ускорением Кориолиса.

Рассчитаем ускорение Кориолиса по формулам (3.12), (3.8), (3.24):

$$aк(3.12) = (V_{лс} - V_{лб})/t = (463{,}7372963 - 463{,}7314815)/4 = \underline{\mathbf{0{,}0014\ м/с^2}}$$

$$aк(3.8) = \omega * V_ц = \overset{\omega}{(463{,}7372963/6380080)} * \overset{V_ц}{(9{,}8 + 0{,}033706831 + 0{,}033706409) * 4 / 2} = \underline{\mathbf{0{,}00143443\ м/с^2}}$$

$$aк\,(3.24) = \omega * Vр_н + \omega * t * (a_{цс} + a_{цб})/2 = \overset{\omega}{(463{,}7372963/6380080)} * \overset{Vр_н}{(0)} + \overset{\omega}{(463{,}7372963/6380080)} * \overset{t}{4} * \overset{(aрс\ +\ aрб)}{(0 + 0{,}033706831 + 9{,}8 + 0{,}033706409)} / 2 = \underline{\mathbf{0{,}00143443\ м/с^2}}$$

Таким образом, получили хорошо согласующиеся между собой значения (aк) по трем различным формулам (3.12), (3.8), (3.24). Ускорение Кориолиса по (3.8) и (3.24) получилось несколько больше, чем по (3.12). При вычислении среднего значения радиальной скорости падения тела (Vц) необходимо знать точное значение радиуса Земли, точное значение ускорения тяготения на поверхности Земли и на уровне дна шахты, а также учитывать изменение ускорения тяготения при уменьшении радиуса во время падения.

Составляющую окружных участков пути, пройденную телом по дуге окружности с переменным радиусом под действием ускорения Кориолиса, можно рассчитать по формуле (3.10)

$$S(3.10) = \underline{\mathbf{a_{ко}}} * t^2 / 2 = \mathbf{0{,}0116296\ (м/с^2)}$$

Этот путь не равен отклонению тела от вертикали при свободном падении. Это совершенно разные вещи. При свободном падении отклонение тела от вертикали происходит за счет разности скоростей тела и дна шахты. Линейная скорость свободно падающего тела не изменяется. Под действием же силы

Кориолиса, возникающей при взаимодействии падающего тела с восточной стенкой шахты, линейная скорость тела уменьшается от значения линейной скорости тела на поверхности до линейной скорости дна шахты. Поэтому путь, пройденный за счет ускорения Кориолиса, эквивалентный пути, пройденному со средней линейной скоростью переносного вращения при радиальном движении тела в два раза меньше, чем путь, пройденный за счёт разницы скоростей тела на поверхности и у дна шахты. Соответственно и ускорение Кориолиса будет в два раза меньше, чем гипотетическое ускорение, найденное по результатам отклонения от вертикали свободно падающего тела. Опыт с падением тел не может служить критерием правильности формулы Кориолиса, поскольку в этом опыте проявления силы Кориолиса нет.

9. КРАТКИЙ АНАЛИЗ ВЗГЛЯДОВ СОВРЕМЕННЫХ АВТОРОВ НА ЯВЛЕНИЕ КОРИОЛИСА.

Кандидат технических наук Степан Георгиевич **Тигунцев** в своей статье (*«Эффект Кориолиса – это просто» от 29 апреля 2005г.* ***stiguncev@yandex.ru***.) утверждает, что **ускорение Кориолиса – это разность ускорений инерции двух широт во времени**.

Приведем достаточно обширные выборки из его работы.

«Есть некое ускорение инерции:

*dg=g*V*dt/R*

где g – ускорение свободного падения

Ускорение Кориолиса по Тигунцеву:

*g(кор)=dg(пар1)-dg(пар2)=g*dt*(V(пар1)-V(пар2))/R*

где V(пар) – линейная скорость на параллели

отсюда найдем dt:

*dt=g(кор)*R/(V(пар1)-V(пар2))*g (*)*

Тогда, подставив последнее выражение (*) в первое (ускорение инерции) получим ускорение Кориолиса:

g(кор)=dg(мер)(V(пар1)-V(пар2))/V(мер)»*

Далее Тигунцев предлагает проверить свои формулы на практике (приведем оригинальный текст):

«Для проверки правильности методики рассмотрим соответствие расчёта эксперименту. В учебнике физики (авторы Л. Д. Ландау, А. И. Китайгородский, Наука, 1974 г.) показан эксперимент, в котором на экваторе падает тело в шахту с высоты 80 метров и отклоняется при этом на 2,3 см к востоку.

Сначала определим линейную скорость вращения Земли для радиусов 6380080 м и 6380000 м по выражениям (10) и (11), соответственно, 463,7372963 м/сек и 463,7314815 м/сек. Затем определим ускорения инерции для указанных радиусов по выражениям (12) и (13) для отрезка времени 4 сек (время падения тела с высоты 80 м), соответственно, 0,002849295 м/сек^2 и 0,002849259 м/сек^2».

Ниже приводится фотокопия формул и расчетов автора и наше их отображение с исправлением явных опечаток.

$$V_{(пар)1} = 2 * 3,14 * R_1 / T = 6,28 * 6380080 / 86400 = 463,7372963\ м/сек \quad (10)$$

$$V_{(пар)1} = 2 * 3,14 * R_1 / T = 6,28 * 6380080 / 86400 = 463,7314815\ м/сек \quad (11)$$

$$dg_1 = g * V_{(пар)1} * dt / R = 9,8 * 463,7372963 * 4 / 6380000 = 0,002849295\ м/сек\hat{}2 \quad (12)$$

$$dg_2 = g * V_{(пар)2} * dt / R = 9,8 * 463,7314815 * 4 / 8380000 = 0,002849259\ м/сек\hat{}2 \quad (13)$$

$$g_{(кор)} = dg_1 - dg_2 = 3,573*10\hat{}{-8}\ м/сек\hat{}2 \quad (14)$$

$$dt * (V_{(пар)1} - V_{(пар)2}) = g_{(кор)} * R / g \quad (15)$$

$$dt * (V_{(пар)1} - V_{(пар)2}) = 4 * 0,005814815 = 0,023259\ м \quad (16)$$

$$g_{(кор)} * R / g = 3.573*10\hat{}{-8} * 6380000 / 9.8 = 0.023259\ м \quad (17)$$

$V_{(пар)1} = 2 * 3,14 * R_1 / T = 6,28 * 6380080 / 86400 = 463,7372963$ м/сек *(10)*

$V_{(пар)2} = 2 * 3,14 * R_1 / T = 6,28 * 6380000/86400 = 463,7314815$ м/сек *(11)*

$dg_1 = g * V_{(пар)1} * dt / R = 9,8 * 463,7372963 * 4 / 6380000 = 0,002849295$ м/сек^2 *(12)*

$dg_2 = g*V_{(пар)2} * dt / R = 9,8 * 463,7314815 * 4 / 6380000 = 0,002849259$ м/сек^2 *(13)*

$g_{(кор)} = dg_1 – dg_2 = 3{,}573 * 10^{-8}$ м/сек^2 *(14)*

$dt*(V_{(пар)1} - V_{(пар)2}) = g_{(кор)} * R / g$ *(15)*

$dt*(V_{(пар)1} - V_{(пар)2}) = 4 * 0{,}005814815 = 0{,}023259$ м *(16)*

$g_{(кор)} * R / g = 3{,}573*10^{-8} * 6380000 / 9{,}8 = 0{,}023259$ м *(17)*

*«Определяем ускорение Кориолиса как разность ускорений инерции для указанных радиусов по выражению (14) 3,573*10^{-8}.*

Преобразуем (*) в (15), где в левой части показано произведение разницы линейных скоростей вращения Земли на отрезок времени (4 сек), которое является расстоянием, на которое сместится тело под действием силы Кориолиса.

Получаем по (16) отклонение тела на 2,326 см. И получаем по (17) отклонение тела на 2,326 см. Более точный результат получим, если разобьём путь 80 м на участки и определим отклонения для каждого участка».

Выше уже отмечалось, что по нашему мнению, свободное падение тел, как вид свободного движения тел, не относится к сфере действия силы Кориолиса. Если бы отклонение от вертикали происходило под действием ускорения, полученного по формуле Тигунцева, то расхождение с опытными данными, полученными при свободном падении тел на землю, было бы просто огромным. Действительно, подставив ускорение Кориолиса (*а*к), полученное по формуле (14) по Тигунцеву в формулу для пути, пройденного с ускорением (3.10) получим:

S (с учетом *ак* по Тигунцеву) = *ак* * t ^{2} / 2 = 3,573 * 10^{-8} * 4 ^{2} / 2 =

= **0,000000286 м**

Чтобы согласовать формулу Тигунцева (14) с опытными данными понадобился бы дополнительный множитель не «2», а около «80 000».

Авторы из Удмуртии (***maholet.aero.ru***) утверждают, что «*формула ускорения Кориолиса при движении по направляющей завышена в два раза*» и соглашаются, что «*сила Кориолиса количественно верна*». Но считают, что для небесной механики в **два раза завышено не только ускорение Кориолиса, но и сила Кориолиса.** Приведем оригинальный текст:

«3.4.1. Замечания о силе Кориолиса

Ошибка заключается в том, что применяется теорема Кориолиса, которая годится лишь для грубого описания случаев движения тела в «жёсткой» трубке. Эта трубка (или канал) движутся с постоянной угловой скоростью ω, что неприемлемо для свободного движения тела, когда угловая скорость изменяется, как и в данном случае со стулом.

Теорему Кориолиса ошибочно применяют при анализе отклонений падения тел на землю, например, в шахту. Опытные данные подгоняют под теорему, как и аналогичные задачи в учебниках.

Сила Кориолиса определяется по формуле (жирным шрифтом выделяем вектора):

$\mathbf{F}_к = - \mathbf{a}_к \cdot m = -2\, \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{V}_r \cdot m$,

где $\mathbf{V}_r$ *– радиальная скорость движения тела массой т,* $\boldsymbol{\omega}$ *– его угловая скорость. Это в 2 раза больше, чем при свободном движении тела. Направления ускорения и силы Кориолиса противоположны. При свободном же движении сила и ускорение имеют одно направление.*

Применение теоремы Кориолиса для свободного движения (например, планеты) не соответствует закону сохранения энергии.

Ускорение у Кориолиса завышено в 2 раза ошибкой при взятии производной вектора переносной скорости, из-за отрыва от физики.

Сила Кориолиса (при движении в трубке) количественно верна, но не обоснована физически. Половина силы Кориолиса, действительно, является силой инерции: при приближении к центру вращения тело тормозится трубкой, при удалении – разгоняется. Другая же половина силы обусловлена действием центробежной силы, точнее, её проекцией на направление, перпендикулярное радиусу движения в плоскости орбиты (о ней будем говорить далее). Эта половина силы не даёт ускорения – не позволяет трубка. Сила Кориолиса – это сумма двух различных сил».

Авторы не приводят поясняющий рисунок, поэтому, чтобы прокомментировать приведенный выше оригинальный текст, проиллюстрируем точку зрения авторов графически на Рис. 9.1. Центробежная сила (Fц), по мнению авторов, направлена вдоль радиуса кривизны (О1,В) дуги (ВС). Авторы полагают, что вторая половина силы Кориолиса, обусловлена силой Fц1 (см. Рис.9.1). Однако центробежная сила это **не самостоятельная активная сила,** которая действует вдоль радиуса кривизны.

В соответствии с изложенным механизмом вращательного движения центробежная сила это всего лишь радиальная составляющая результирующей силы, действующей в направлении переносного вращения. Среднее направление результирующей силы совпадает с вектором линейной скорости криволинейного движения, т.е. с касательной к кривой (ВС). Вектор результирующей силы может иметь проекцию на любое попутное направление в полуплоскости, ограниченной линией, перпендикулярной к среднему положению вектора результирующей силы и не может иметь проекцию ни в одном из направлений в обратной полуплоскости.

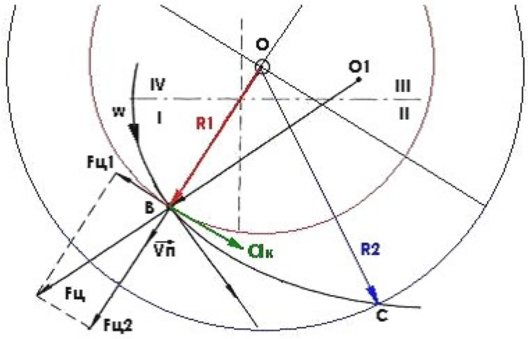


Рис. 9.1

Авторы утверждают, что: «*Направления ускорения и силы Кориолиса противоположны*». Здесь авторы, наверное, противоречат сами себе. Ведь, по их мнению (см. ниже) ускорение это скалярная величина: «*Как уже отмечалось в нашей работе (пар.3.3),* ***ускорение – это изменение скалярной величины скорости (или просто – величины скорости).*** *Направление ускорения определяется направлением ускоряющей силы*».

В связи с этим не понятно, как сила и вызванное ей ускорение могут иметь противоположные направления? Ведь сила Кориолиса является ускоряющей силой для тела, движущегося с ускорением Кориолиса в направлении от центра вращения. Другое дело, что сила реакции, действующая со стороны тела на «трубку» направлена противоположно ускорению Кориолиса.

Далее авторы рассматривают движение свободнолетящего тела под действием центральной силы. Приведем еще одну цитату*:*

«3.4.2. Свободное движение

На рис.8 тело массы m под действием центральной силы ***F*** *(с центром в точке О) движется по кривой L переменного радиуса кривизны* ***R'*** *с центром кривизны O' со скоростью* ***V****. Точка П – перицентр орбиты L. Скорость тела, находящегося в точке в, разложим на 2 составляющие:* $\boldsymbol{V_R}$ *–радиальная,* ***Vокр*** *– перпендикулярно радиусу обиты* ***R*** *.*

На тело m, помимо сил инерции, действуют 2 силы: центральная ***F*** *(или центростремительная) и центробежная сила* ***Fц****. Эту последнюю силу нельзя отнести к силам инерции (см. предыдущий параграф 3.3). В небесной механике считается, что планеты движутся под действием одной центральной силы, что окружное (азимутальное, трансверсальное) ускорение равно нулю (спис.лит.- 46), что планеты имеют только центростремительное ускорение (с.л. 59, 76), направленное* <u>*всегда*</u> *к центру тяготения по радиусу. Однако, вечно «ускоряясь», ни одна из них не приблизилась к Солнцу.*

Что же это за алхиметрия?! Если планета не имеет окружного ускорения, то, что же заставляет тогда её изменять окружную и угловую скорость, например, при переходе от апоцентра к перицентру?

Итак, центробежную силу ***Fц*** *, действующую по радиусу кривизны, разложим на 2 составляющие****:*** ***F'*** *– по радиусу орбиты (радиальная составляющая),* ***Fокр*** *– перпендикулярно этому радиусу – окружная составляющая.*

С противоположной стороны от центра О в точке а движется центральное тяготеющее тело М (например, Земля, если m – Луна) с меньшим радиусом орбиты R_M *= Оа.*

На рис. 9 представлены ускорения, действующие на тело m. О них поговорим позднее.

Угол ψ – это угол между вектором орбитальной скорости ***V*** *и вектором окружной скорости* ***Vокр****. Он положителен, если* $\boldsymbol{V_R}$ *– положительна. Угловая скорость ψ' положительна, если угол ψ растёт. При движении в I четверти (как на рисунках) и в IV четверти центробежная составляющая* ***F'*** *по модулю больше центральной силы* ***F*** *на величину кс. Они равны при углах истинной аномалии θ = 90º и 270º, что следует из расчётов. Во II и III четвертях F'<F. За счёт разницы этих сил и возникает радиальное ускорение* $\boldsymbol{a}_r$ *, которое два раза меняет свой знак за 1 оборот тела по орбите. В I и IV четвертях это ускорение положительно – направлено от центра. Скорость положительна также при направлении от центра.*

В I и II четвертях тело m, удаляется от центра О, окружная сила ***Fокр*** *направлена назад – тело тормозится (в окружном и орбитальном направлениях). В III и IV четвертях (движение от апоцентра к перицентру) - ускоряется. Эту окружную силу* ***Fокр*** *и заменяют в небесной механике и в ряде земных задач ошибочно силой Кориолиса.*

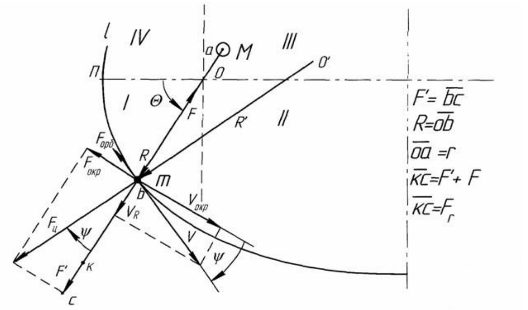


Рис. 8. Движение под действием центральной силы F

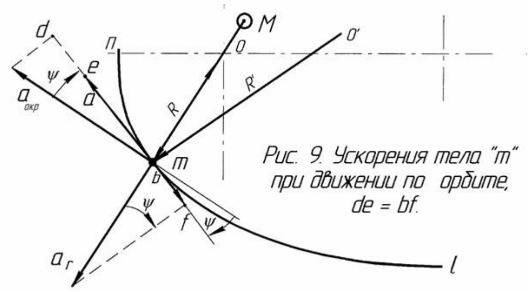


Рис. 9. Ускорения тела "m" при движении по орбите, de = bf.

Определим величину окружной силы и окружного ускорения .

<u>1 вариант вывода</u>. Величина этой силы была определена из сравнения работ центральной и орбитальной сил. Производилось также сравнение работы орбитальной силы с изменением кинетической энергии тела m (например, для случая на рис.10) с учётом того, что при отсутствии момента внешних сил момент количества движения постоянен (есть теорема), то есть в скалярном виде

$L = m \cdot V \cdot R \cdot \cos\psi = const.$

Задача решена на частных примерах и в квадратурах. Получилось, что все три энергии равны, если окружная сила (в скалярном виде):

$F_{окр} = a_{окр} \cdot m = -V_R \cdot \omega \cdot m.$

Здесь: окружное ускорение $a_{окр} = -V_R \cdot \omega$,

ω*- угловая скорость.*

Знак минус (-) означает, что при положительной радиальной скорости V_R *(движение от перицентра к апоцентру - подъём) ускорение и сила отрицательны, то есть тело тормозится.*

<u>2 вариант</u>. Величину окружной силы можно определить из 2 закона Кеплера, который запишем в скалярной форме:

$\acute{S} = ½\, R\, V \cos\psi = ½\, R\, V_{окр} = const.$

Секториальная скорость Ś постоянна, поэтому её производная по времени равна нулю:

$\acute{S}'_t = ½\, [\, R'_t \cdot V_{окр} + R \cdot (V_{окр})'_t \,] = 0.$

Здесь:

$R'_t = V_R$ *- радиальная скорость, поскольку* R *- скаляр;*

$(V_{окр})'_t = a_{окр}$ *- окружное ускорение;*

$V_{окр} = \omega \cdot R_{окр} = \theta' \cdot R_{окр}$.

Тогда уравнение можно записать так :

$V_R \cdot \omega \cdot R_{окр} + R_{окр} \cdot a_{окр} = 0$.

Сократив на Rокр, получим :

$a_{окр} = -V_R \cdot \omega.$ *(формула 3.4.2.1)*

Окружная сила, с учётом 2 закона динамики, будет равна:

$F_{окр} = a_{окр} \cdot m = -V_R \cdot \omega \cdot m$. *(форм.3.4.2.2)*

Вновь получили такое же выражение окружного ускорения и окружной силы, что и в 1 варианте.

Ньютон, Лагранж и их последователи до наших дней допускают ошибку при выражении секториальной скорости:

$\acute{S} = ½\, R V_{окр}.$

Её просто заменяют геометрическим выражением :

$S = ½\, R^2_{окр}\, \omega,$

где радиус $R_{окр}$ *- фиксированная величина (в действительности* $R \neq R_{окр}$) .

При взятии производной это даёт другой результат – окружное ускорение aокр получается с двойкой, как у Кориолиса, но с другим знаком.

<u>3 вариант</u>. Вместо 2-го закона Кеплера (во втором варианте вывода) можно взять закон постоянства момента количества движения в скалярной форме: $M = m\ V\ R\ cos\psi$. Результат опять будет таким же.

Таким образом, при орбитальном свободном движении тело имеет окружное (азимутальное) ускорение аокр под воздействием окружной силы эфира

$F_{окр} = -V_R \omega \cdot m$.

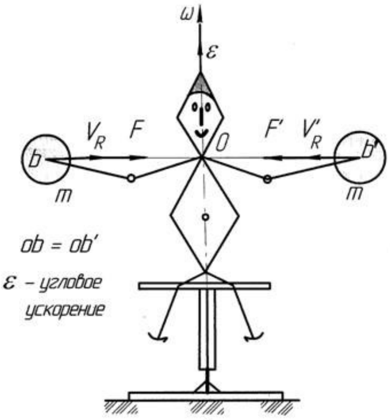
*Когда человек с гантелями вращается на стуле (рис.10), подтягивая их к себе, он ускоряется этой окружной силой. Этой силе приходится здесь разгонять не только гантели, но и человека со стулом. Поэтому ускорение разгона будет меньше, чем **аокр**. Следовательно, в <u>общем случае</u> тело испытывает напряжённость окружной силы:*

$a_{окр}^{н} = F_{окр} / m$

А само ускорение тела будет

$a_{окр} = F_{окр} : m_{пр}$,

где $m_{пр}$ - приведённая масса тела (стандартное понятие).



$$A_F = A_{орб} = \Delta W_к \text{ или } \int_{R_0}^{R_к} F dR = \int_{l_0}^{l_к} F_{орб}\, dl = \frac{m}{2}(V_к^2 - V_0^2)$$

Рис. 10. Вращение на стуле– скамье Жуковского

Определим связь между ускорениями свободного тела m (согласно рис.8 и 9).

Продифференцируем по времени скорости :

$V_{окр} = V cos\psi$, $V_R = V sin\psi$.

Получим значения окружного и радиального ускорений:

$a_{окр} = (V_{окр})' = V' cos\psi - V\ sin\psi \cdot \psi' = a\ cos\ \psi - V\psi' sin\psi$,

где $a = V'$ - орбитальное ускорение;

$a_r = (V_R)' = V' sin\psi + V cos\psi \cdot \psi' = a sin\psi + V\psi' cos\psi$

- радиальное ускорение, направлено по радиусу орбиты; оно положительно, если направлено от центра.

После исключения произведения $V\psi'$ из обоих выражений и несложных преобразований получим соотношение <u>ускорений</u> (в общем случае при несвободном движении - <u>напряжений):</u>

$a = a_{окр} cos\psi + a_r sin\psi$ (формула 3.4.2.3).

Орбитальное ускорение равно сумме проекций окружного и радиального ускорения на направление касательной к траектории.

Орбитальная сила имеет направление ускорения и равна:

$F_{орб} = ma$ (3.4.2.4).

Для вычисления радиального ускорения надо сумму центробежной составляющей и центральной (центростремительной) сил (с учётом их знака) разделить на массу тела:

$a_r = (F' + F)/m = (F' - |F|)/m = F_r/m$ (3.4.2.5).

Здесь F_r является радиальной силой, под действием которой и происходят <u>радиальные</u> перемещения и изменения скорости.

Умножим равенство 3.4.2.3 на массу тела m, получим:

$ma = ma_{окр} cos\psi + ma_r sin\psi$.

Или, учитывая предыдущие соотношения и определения:

$F_{орб} = F_{окр} cos\psi + F_r sin\psi$ (3.4.2.6).

Орбитальная сила равна сумме проекций окружной и радиальной сил на направление касательной к траектории.

Таковы реальные физические ускорения и силы, действующие на движущееся тело под действием центральной силы.

Заметим, что при определении ускорений производная бралась не от вектора скорости (как принято в классической механике), а от величины скорости. Как уже отмечалось в нашей работе (пар.3.3), ***ускорение – это изменение скалярной величины скорости (или просто – величины скорости).*** *Направление ускорения определяется направлением ускоряющей силы.*

Как видно, мы не обнаружили центростремительного ускорения и в данной задаче. Есть радиальное ускорение, которое может быть направлено как к центру, так и от центра. Оно соответствует реальным перемещениям и изменениям скоростей тела. Нет центростремительных ускорений, есть центростремительные напряжения, вызванные центральной силой. И это следовало бы различать. Но физико-математики с этим не считаются. И складывают ускорения с напряжениями. И иногда получают теоремы.

Ускорение – это результат действия напряжений.

Следует обратить внимание, что окружные и орбитальные силы и ускорения дают проекцию на ось апсид (большая ось орбиты), всегда направленную к перицентру.

Справедливость полученных выражений можно проверить простым численным примером движения Земли вокруг Солнца. Нами проводились различные эксперименты по вращению тел с переменным радиусом. Под действием орбитальной силы эфира раскачиваются качели, падают тела, движутся планеты, спутники и т.д..

В литературе по баллистике и небесной механике в уравнениях орбитального движения, составленных в полярных или сферических координатах, присутствуют компоненты ускорения и силы Кориолиса, что даёт погрешность в расчётах траекторий.

Лишь то, что движется по Земле (поезда, реки…) или в «трубке» с постоянной угловой скоростью, испытывает действие сил Кориолиса с учётом замечаний подпараграфа 3.4.1.

В случае свободного движения тела в поле центральной силы работает схема сил и ускорений, представленная в данном подпараграфе 3.4.2. По данной схеме раскачиваются качели, падают тела, движутся по орбитам спутники, планеты и т.д.. Маятник Фуко испытывает действие орбитальной силы, но оно не влияет на суточный период обращения плоскости качаний, поскольку действие этой силы за полупериод качания компенсируется её противоположным действием за следующий полупериод».

Авторы считают, что все силы вращательного движения обусловлены движением тел в мировой среде эфире, т.е. все силы вращательного движения возникают под действием внешних сил.

«…*Она* (центробежная сила - авт.) *является обычной силой, подобной силам аэрогидродинамики, как, например, подъёмная сила крыла», «…центробежная сила есть результат сквозного обтекания тела эфирной средой».*

Мы не против признания эфира, как мировой среды и в этом отношении полностью согласны с В. А. Ацюковским (*см. «ОБЩАЯ ЭФИРОДИНАМИКА»)*. Но речь может идти только о влиянии эфира, как дополнительного фактора, а не как фактора, образующего вращательное движение. Ведь выталкивающая сила эфира появится только при разности скоростей обтекания эфиром движущегося тела. Скорость обтекания эфиром тела движущегося равномерно и прямолинейно со всех сторон одинаковая. Для получения разности скоростей необходимо иметь установившееся вращательное движение, когда скорость обтекания со стороны центра вращения будет отличаться от скорости с внешней стороны. Значит вначале должно возникнуть вращение со всеми вытекающими последствиями, а уже потом начнет сказываться влияние эфира. Поэтому представленная авторами схема образования сил вращения правомерна только для установившегося вращения. При этом описанные силы, ни какого заметного влияния на параметры движения не окажут. Силы сопротивления эфирной среды для движения макротел настолько малы, что их проявление можно обнаружить только точными экспериментами или длительными наблюдениями. Силы воздействия эфирной среды на движение макротел можно рассматривать как дополнительный фактор, который в некоторых случаях необходимо учитывать, а не как основной фактор, определяющий движение тел.

Из приведенных цитат следует, что тело тормозится и ускоряется не за счет силы тяготения, а за счет составляющей центробежной силы (Fц1) (см. Рис.9.1). А сила, не позволяющая планетам упасть на Солнце, по мнению авторов, это составляющая центробежной силы (Fц2).

Попробуем разобраться *«Что же это за алхиметрия?!…»,* говоря языком первоисточника, что же на самом деле заставляет разгоняться и тормозиться планеты и что удерживает их на своих орбитах? Удаляясь от Солнца планеты, тормозятся, т.к. ускорение тяготения направлено противоположно скорости движения. То есть сила тяготения направлена против проекции линейной скорости движения планет на направление действия силы тяготения. При приближении к Солнцу, скорость планет совпадает с ускорением тяготения, так как проекция линейной скорости движения на физический радиус и сила тяготения имеют одно направление. На круговых орбитах средняя скорость движения постоянна.

Ответ на второй вопрос, что удерживает планеты на своих орбитах, и почему они не падают на Солнце еще проще. Это, конечно же, центробежная сила инерции. Только сила инерции это не сила (Fц2), которая является проекцией центробежной силы (Fц) в представлении авторов. Центробежная сила инерции является проекцией результирующей силы криволинейного движения небесного тела по орбите на радиальное направление.

Относительно мнения авторов, что в небесной механике в два раза завышено не только ускорение, но и сила Кориолиса, можно сказать следующее. По нашему мнению в небесной механике сила Кориолиса не действует, поскольку сила тяготения не передает вращательного движения. При криволинейном движении любую силу можно выразить через угловую и радиальную скорость, но это еще не значит, что она является силой Кориолиса. Небесное тело, вращающееся относительно центрального тяготеющего тела по круговой (для простоты) орбите является вращающейся системой переносного вращения только для тел, движущихся относительно этого небесного тела, причем в непосредственном механическом контакте с ним. Небесное тело, движущееся по орбите не получает никакого вращательного движения в «чистом виде» от какой-то посторонней для него вращающейся системы. Оно само является участником вращательного движения, которое образуется в результате обычных взаимодействий небесного тела с внешней для него силой тяготения. Причем сила тяготения действует непосредственно вдоль прямой, соединяющей центры масс взаимодействующих тел и вращательного движения источника тяготения не передает.

Конечно же, внешние проявления движения тел в небесной механике имеют некоторое подобие действия сил Кориолиса. Это невозможно отрицать. По-видимому, все взаимодействия материальных тел имеют одну природу и в этом смысле можно считать, что вообще все взаимодействия в некотором (философском) смысле одинаковые. Однако различия между взаимодействиями внутри жесткой вращающейся системы, при котором имеется непосредственный механический контакт и взаимодействиями в небесной механике настолько велики, что их трудно ставить в один ряд.

Ряд авторов, с которыми мы не согласны относительно природы силы Кориолиса, предлагают, совершенно несостоятельные, на наш взгляд, идеи, например, движитель кориолисового типа.

Так Сергей **Макухин** (***makss59@mail.ru*** *дата публикации 28.10.2003 г. источник* ***SciTecLibrary.ru***) пишет:

«Космическое “антигравитационное” – левитирующее средство, на мой взгляд, возможно. Если его выполнить в виде контурной трубчатой равнобедренной трапеции, направленной малым основанием вниз, а большим вверх, так чтобы ее стороны совпадали с нормалями, например на экваторе, к поверхности Земли или иначе служили продолжениями радиусов, направленных к центру планеты. Понятно, что чем больше масштабы конструкции и скорость жидкости в этом замкнутом контуре, тем больше подъемная сила или если ток в контуре-трапеции сменить на обратный – она будет утяжеляться. Заметим, что основания трапеции будут располагаться параллельно поверхности земли. Для этой цели может подойти проводящий контур-трапеция, в котором течет электрический ток. Конструкция может иметь и объемный вид при каркасно-контурном расположении в пространстве. Механика этого процесса такова, что “противоположные” векторы силы Кориолиса на перевернутой трапеции перпендикулярны радиусам-нормалям Земли, совпадающими со сторонами контурной трапеции и поэтому их сложение не дает в сумме нуль по вертикали, так как нормали находятся под углом друг к другу. Что и обеспечивает подъем конструкции или ее утяжеление за счет суммы “противоположных” сил Кориолиса в контуре ».

Куда бы ни была направлена сила Кориолиса со стороны потока в замкнутой системе: трапеция-Земля, она будет уравновешена реакцией системы. Сила Кориолиса ни к чему, кроме напряжения конструкции не приведет. Может быть, в зависимости от жесткости материала трапеции, центр тяжести трапеции несколько отодвинется от поверхности за счет деформации, но только без полного отрыва трапеции от земли.

Воздействие на замкнутую систему сил отталкивания или притяжения не противоречит физике, например, за счет электромагнетизма, если в системе протекает электрический ток. Но это не есть воздействие через пустоту. Воздействие через пустоту, или дальнодействие, вообще не возможно. Носители магнитного поля имеют непосредственный контакт с током, протекающим в системе. Сила же Кориолиса не может действовать на расстоянии, подобно магнитному полю, поскольку сила Кориолиса это сила взаимодействия тел внутри вращающейся системы. **Носителей силы Кориолиса, действующих на расстоянии, в природе не существует**, а сила тяготения вращательного движения не передает. Поэтому через некоторое время, обусловленное инерцией трапеции и инерцией рабочего тела, после предполагаемой автором потери трапецией прямого контакта с Землей, движущийся поток приведет к выравниванию линейных скоростей нижнего и верхнего оснований трапеции относительно центра вращения Земли.

С потерей прямого контакта с Землей перестанет действовать сила, разгоняющая движущийся внутри трапеции поток от линейной скорости, соответствующей радиусу уровня нижнего основания, до линейной скорости радиуса уровня верхнего основания. Выражаясь словами автора, когда «боковые стороны трапеции» перестанут быть «продолжением радиусов планеты», сила Кориолиса перестанет действовать. При этом вся конструкция подобно телу, брошенному в шахту, упадет на землю с отклонением на восток. И то, что внутри контура при этом будет циркулировать поток жидкости или ток, нисколько этому нет помешает.

Приходовский Михаил Анатольевич *(Приходовский Михаил Анатольевич (канд. физ.-матем.наук, г.Томск) prihod1@mail.ru, 07.04.04 www.INAUKA.ru*) так же поддерживает идею полетов с использованием силы Кориолиса. Он предлагает использовать силу Кориолиса, действующую на тело со стороны, вращающейся вселенной. Даже люди с учеными степенями полагают, что сила Кориолиса может действовать на расстоянии. Сила Кориолиса действует только внутри вращающейся системы, и далекие полеты за ее пределы с помощью силы Кориолиса по нашему мнению, вряд ли возможны.

Другой автор, **Суханов** Владимир Николаевич предложил вывод полной формулы ускорения Кориолиса (*Зарегистрировано во ВНТИЦ 01 декабря 2000 года под номером 72200000039 статья опубликована в книге "Изобретательское Творчество"* в 2003):

« 2.1. Вывод полной формулы ускорения Кориолиса

В статье представлен вывод формулы Кориолиса ускорения с использованием закона сохранения энергии.

Полная формула Кориолиса ускорения (см. Приложение п. 2.2 "Ускорение относительного движения, возникающее в центре вращения системы отсчета") имеет вид:

$$X''_1 = \omega X'(2X-dX) / (X-dX)\ ;$$
$$X''_2 = \omega X'(2X+dX) / (X+dX)\ ,$$

Где: ω *- угловая скорость вращения системы отсчета,*

X' *- линейная относительная скорость материальной точки, направление которой пересекает центр вращения системы отсчета,*

X *- расстояние между центром вращения системы отсчета и материальной точкой,*

dX *- величина приращения* X*, стремящаяся к нулю,*

X''_1 *- ускорение Кориолиса при приближении материальной точки к центру вращения,*

X''_2 *- ускорение Кориолиса при удалении материальной точки от центра вращения.*

2.2. Ускорение относительного движения, возникающее в центре вращения системы отсчета.

Известна формула Кориолиса ускорения X'' *материальной точки:*

$$X'' = 2\omega\ V\ ,$$

Где: ω *- угловая скорость вращения системы отсчета,*

V *- линейная относительная скорость материальной точки, направление вектора которой пересекает центр вращения системы отсчета.*

Если материальная точка, при своем движении, пересекает центр вращения системы отсчета, то

$$X'' = \omega V\ .$$

То есть Кориолиса ускорение изменяется от обычного в два раза. Полная запись формулы Кориолиса ускорения (см. Приложение п. 2.1 "Вывод полной формулы ускорения Кориолиса"), при приближении к центру, может быть представлена в виде:

$$X'' = \omega V(2X - dX) / (X - dX)\ ,$$

Где: X *- расстояние между центром вращения системы отсчета и материальной точкой,*

dX *- величина приращения* X*, стремящаяся к нулю.*

В большинстве случаев X *не стремиться к нулю, следовательно:*

$$(2X - dX) / (X - dX) = 2\ .$$

Следует отметить, что при приближении к центру на расстояние несколько dX*,* X'' *начинает возрастать и при* X *стремящемся к* dX*,* X'' *стремиться к бесконечности и меняет свой знак на противоположный. Кориолиса ускорение начинает действовать в противоположном направлении по сравнению с обычным. Далее,* X'' *резко снижается до нуля (при* X *стремящемся к* $0{,}5dX$*) и снова возрастает. При прохождении через центр (*X*=0)* $X'' = \omega V$*. При удалении от центра* X'' *стремиться к* $2\omega V$ *и при* X *достигшим нескольких* dX*,* X'' *- практически уже равно* $2\omega\ V$*.*

Полная запись формулы при удалении от центра:

$$X'' = \omega V(2X+dX) / (X+dX)$$ *(см. график).*

Графические зависимости двух приведенных формул для ***X''*** *, имеют зеркальную симметрию по вертикали (оси* ***X''****).*

Режим приближения к центру может быть опасным для механизма (и перемещения в целом) из-за броска величины ускорения от нормального до нуля через бесконечность с изменением знака. При этом не исключены разрушения. Предложенное уточнение может объяснить неожиданности, возникающие при полетах летательных аппаратов в турбулентной атмосфере и у географических полюсов.

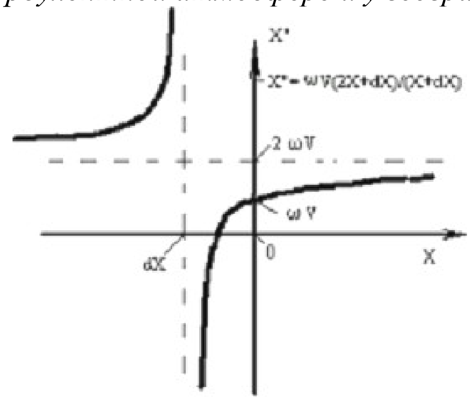


График.
Ускорение относительного движения,
возникающее в центре вращения системы отсчета.

С некоторыми выводами автора можно согласиться, однако далеко не со всеми. При приближении к центру вращения за счёт резкого увеличения угловой скорости вращения абсолютное ускорение, в том числе и ускорение Кориолиса действительно резко увеличиваются и теоретически стремятся к бесконечности, а в центре вращения ускорение Кориолиса действительно равно половине классического ускорения Кориолиса ***(X''=ωV)***. Причем ускорение Кориолиса при неизменной радиальной и угловой скорости, в том числе и за счёт отсутствия относительного движения, перпендикулярного радиусу всегда равно половине классического ускорения Кориолиса, а не только в центре переносного вращения.

Однако ни на расстоянии до центра вращения (X) стремящемся к (**0,5dX**), ни непосредственно в центре вращения, ни на любом другом расстоянии от центра вращения ускорение Кориолиса никогда не равно нулю. В центре вращения в нуль обращается только центростремительное ускорение в составе абсолютного движения, в том числе и ***дополнительное ускорение*** при нормальном к радиусу относительном движении, что ещё раз подтверждает, что ***дополнительное ускорение*** не является ускорением Кориолиса, а является неотъемлемой частью центростремительного ускорения.

У Приходовского при значении (**X**) стремящемся к (**0,5dX**) ускорение Кориолиса стремится к нулю, а затем снова возрастает до ***(X''=ωV)*** в центре переносного вращения и до ***(X''=2ωV)*** при достижении радиуса переносного вращения нескольких (**dX**)**.** На графике видно, что при (X=–0,5*dX**)** ускорение Кориолиса равно нулю, а при положительных значениях (X) в симметричной точке (X=+0,5*dX**)** ускорение Кориолиса равно промежуточному значению между (***ωV***) и (***2ωV***). Из этого следует, что точки радиуса, соответствующие (X=|0,5*dX|**)** при разных направлениях радиального движения имеют разные физические свойства. Если сменить направление радиального движения, то, следуя логике автора точки (X=|0,5*dX|**)** поменяют свои свойства с точностью до «наоборот», что необъяснимо с физической точки зрения.

К сожалению, автор не приводит обоснования своих взглядов с физической точки зрения, что стало традиционным для современной физики явлением. По-видимому, все свои выводы автор сделал исключительно на основе математического анализа предложенной им формулы. Поэтому физический смысл ускорения Кориолиса в видении автора, а также наличие множителя «2» в приведённой формуле вдали от центра вращения остаётся, как и следовало ожидать по традиции современной физики, без объяснения.

10. БЕЗОПОРНОЕ ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ.

Рассматривая вопросы вращательного движения нельзя обойти стороной явление безопорного движения, которое напрямую связано с вращением. Во второй трети двадцатого столетия в физике появился «феномен» безопорного движения, которое демонстрировали устройства под названием инерцоиды. Наука долгое время игнорировала это явление. Официальная физика до сих пор считает, что такое движение противоречит основным законам природы и в частности третьему закону Ньютона, закону сохранения энергии и закону сохранения импульса.

Так В. Околотин на сайте N-T.ru с иронией пишет: «*При конструировании инерцоидов не забывайте, чем это грозит. Ведь если подобное удастся, содрогнется не только техника, а и вся наука, ибо на сохранении импульса базируются все знания человечества. А раз так, то не лучше ли, прежде чем браться за очередной инерцоид, проштудировать соответствующую литературу?*»

Наиболее очевидное объяснение движения инерцоида это **взаимодействие с окружающей средой** в условиях, когда сумма сил инерции и сопротивления среды за цикл, равный полному обороту каждого груза не равна нулю. При этом никакого нарушения закона сохранения импульса не происходит. Но, тем не менее, такое объяснение устраивает не всех. Единства среди ученых по поводу природы движения инерцоидов нет. В настоящее время изобретателями разных стран созданы многочисленные модели устройств, способных двигаться поступательно без видимого взаимодействия с внешней средой.

В нашей стране наиболее известен инерцоид В. Н Толчина (Рис.10.1). Сам Толчин и его последователи считают, что инерцоид должен двигаться и без взаимодействия с опорой. По утверждению Г. И. Шипова, такое движение действительно происходит, причем объясняется оно существованием сил инерции как самостоятельного физического феномена, определяемого вводимой физиком характеристикой - "кручением пространства" (по аналогии с определяющей гравитацию "кривизной пространства").

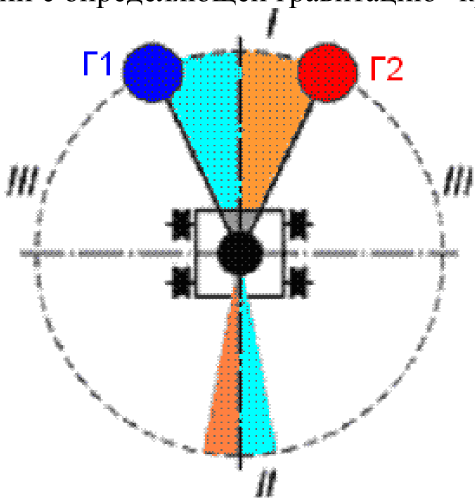


Рис. 10.1 Инерцоид Толчина.

В тележках В. Толчина грузы ускоряются (зона I), замедляются (зона II) или двигаются по инерции (зона III).

Инерцоид Толчина представляет собой тележку, на которой смонтированы вращающиеся грузы (Рис.10.2). Грузы соединены с осями вращения жесткими рычагами. Вращение грузов осуществляется синхронно во встречных направлениях. Если скорость вращения грузов в разных полуплоскостях относительно поперечной оси симметрии разная, то система тележка-грузы осуществляет поступательное движение в сторону полуплоскости, в которой скорость вращения грузов больше. При этом привод на колеса отсутствует. Внешне все выглядит так, как будто инерцоид совершает безопорное движение.

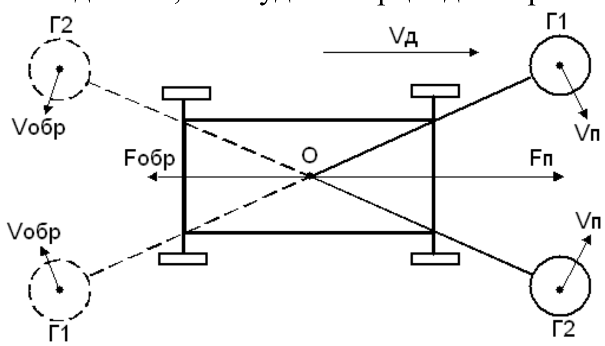


Рис. 10.2

Закон сохранения импульса гласит, что векторная сумма всех изменений импульсов внутри замкнутой системы равна нулю. Если грузы в результате реактивного взаимодействия с тележкой получат импульс движения в каком-то направлении, то в соответствии с законом сохранения импульса тележка должна получить такой же по величине импульс в обратном направлении. При этом общее количество движения всей системы не изменится. Для того чтобы изменить импульс движения замкнутой системы, необходим внешний импульс. Замкнутая система может изменить импульс движения, только получив, или передав часть своего импульса другому телу или части своей массы, которая при этом отделится от замкнутой системы (реактивное движение). Таким образом, основное возражение против безопорного движения заключается в том, что замкнутая система не может изменить количество своего движения без взаимодействия с окружающей средой.

Вполне реально наблюдаемое поступательное движение инерцоидов скептически настроенные исследователи пытаются объяснить за счет силы трения. Как известно, сила трения покоя больше силы трения движения. Поэтому при более интенсивном реактивном взаимодействии грузов и тележки в прямом направлении система легче преодолевает силу трения по сравнению с обратным направлением, где скорость реактивного взаимодействия меньше. В результате вся система рывками передвигается в прямом направлении. Однако не исключено, что роль силы трения в поступательном перемещении инерцоидов несколько преувеличена.

Во-первых: инерцоиды передвигаются поступательно, даже если принять меры по максимально возможному снижению трения в осях колес и в местах соприкосновения колес с плоскостью опоры. Более того, при снижении трения эффект безопорного движения инерцоидов проявляется в еще большей степени. Следовательно, движение инерцоидов нельзя объяснить за счет трения, сдерживающего возвратно-поступательное реактивное движение тележки в одном из направлений больше чем в другом. Инерцоид Толчина, например, преодолевает поперечные преграды, закручивает нить подвешенного коромысла, на котором уравновешены два инерцоида, поднимая все конструкцию вверх и т. п. Кроме того, количественные расчеты поступательного движения с учетом возможных сил трения значительно отличаются от реальных параметров движения инерцоидов.

Во-вторых: поступательное движение инерцоидов за счет силы трения возможно, но повторяемость результатов и стабильность поступательного перемещения при этом будет низкая. Между тем удачные конструкции инерцоидов показывают стопроцентную повторяемость и стабильность. Для того чтобы добиться такой повторяемости за счет силы трения понадобилось бы поставить на колеса инерцоида муфты свободного хода или храповики, позволяющие вращаться колёсам только в одном направлении.

Г. И. Шипов в работе «Теория физического вакуума» М., Наука, 1997 г., а также в ряде своих статей предложил теоретическое обоснование безопорного движения. К сожалению, как и в большинстве современных теорий, упор сделан на феноменологическое и математическое (количественное описание явления). В работах Шипова есть ссылки на обнаруженные отклонения от механики Ньютона без разъяснения сути и причины этих отклонений. Введены некоторые небесспорные понятия, такие как «кручение пространства» и другие. «Кручение пространства» наряду с эйнштейновской «кривизной пространства» является скорее философским понятием, чем физическим. Любое явление, которое пытаются объяснить, основываясь на философских понятиях, не добавляют понимания физической сущности явления. Во всяком случае, большинством современных исследователей безопорное движение по-прежнему не признается даже после выхода в свет теории Г. И. Шипова.

Для того чтобы обосновать или опровергнуть безопорное движение, как реально наблюдаемое в природе явление, недостаточно голословного отрицания со ссылкой на закон сохранения импульса. Не вызывает также доверия и обоснование безопорного движения с помощью феноменологических теорий. Грузы и тележка совершают сложное движение, в котором не легко разглядеть причину реально наблюдаемого поступательного перемещения инерцоидов. Необходима детальная проработка механизма движения инерцоида с точки зрения фундаментальных законов природы. И только взвесив все «за» и «против» можно сделать какие-то выводы.

В процессе вращения грузов под действием привода инерцоида между грузами и тележкой происходит реактивное взаимодействие. Рассмотрим реактивное взаимодействие грузов и тележки только с точки зрения взаимодействия их реальных масс без учёта инерции их движения. Будем считать, что энергия взаимодействия поровну распределяется между взаимодействующими телами и полностью преобразуется в кинетическую энергию движения взаимодействующих тел по линии взаимодействия со скоростями обратно пропорциональными соотношению их масс (Рис. 10.3). При этом будем считать, что линия взаимодействия это оси (OX) и (OY), а реактивное взаимодействие происходит между двумя телами: тележкой и телом под названием «грузы», масса которого равна массе тележки. Когда «грузы» находятся по одну сторону от поперечной оси (OY) такое допущение в плане реактивного взаимодействия «грузов» и тележки вдоль оси (OX) вполне правомерно.

Полный цикл реактивного взаимодействия грузов и тележки вдоль каждой из осей координат происходит на отрезке их максимального сближения или максимального расхождения вдоль выбранных осей в зависимости от фазы процесса. Максимальное сближение и максимальное расхождение между грузами и тележкой определяется размерами радиуса вращения грузов. Поэтому законченным циклом реактивного взаимодействия будем считать взаимодействие грузов и тележки вдоль осей координат в пределах величины радиуса окружности, описываемой грузами. Рассмотрим реактивное взаимодействие грузов и тележки в правой полуплоскости относительно оси (OY) на примере одной первой (I) четверти вращательного движения. На рисунке 10.3 изображена эквивалентная схема инерцоида с приводом вращения грузов, поясняющая действие сил, возникающих в процессе реактивного взаимодействия грузов и тележки.

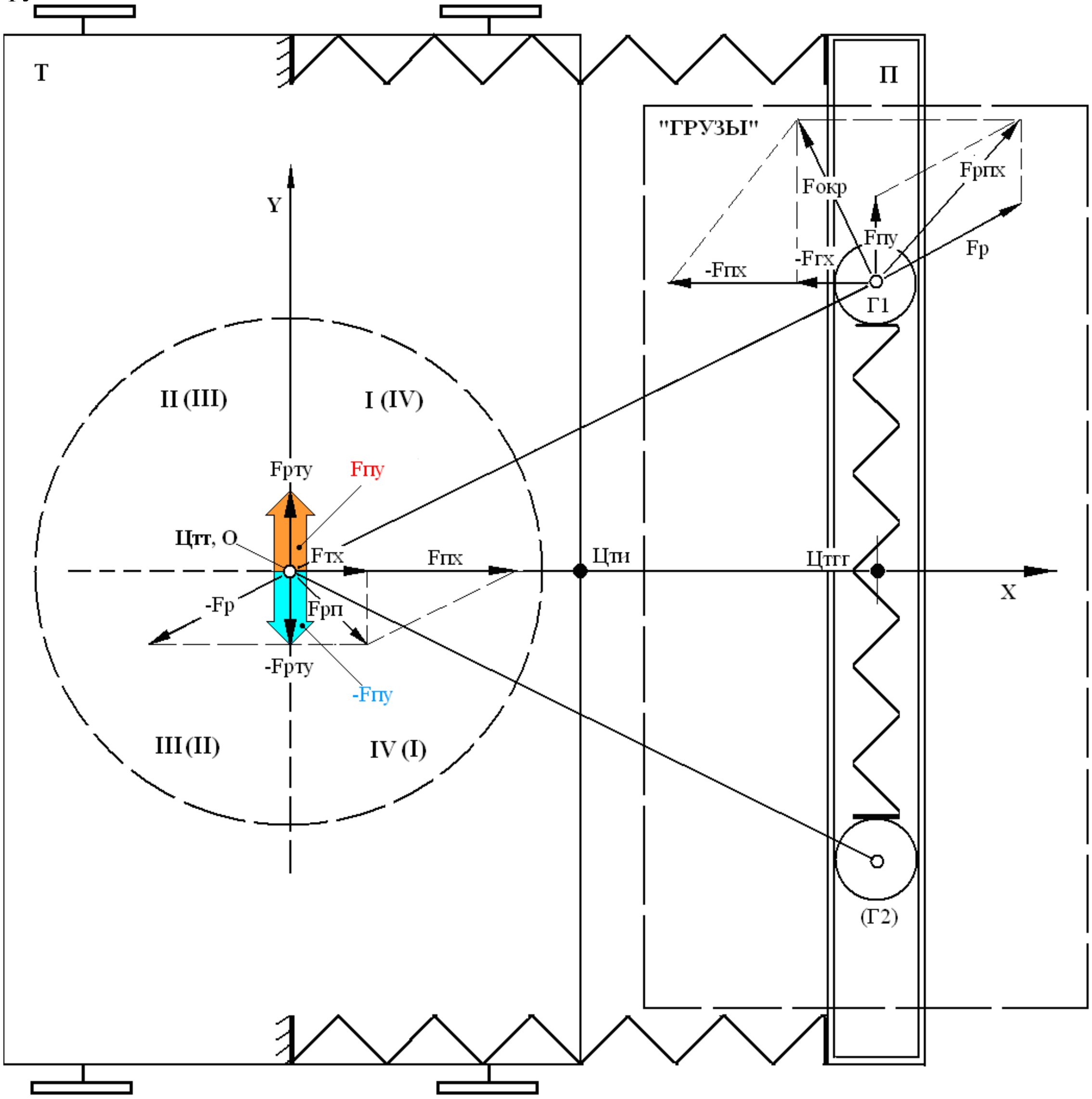


Рис. 10.3

Инерцоид на Рис. 10.3 представлен в виде жесткой балки (Т) и рамки привода (П), между которыми расположены две пружины. Внутри рамки привода находится еще одна пружина, установленная между грузами. Пружины между (Т) и (П) находятся в растянутом состоянии, а пружина между грузами в сжатом состоянии. Пружины приводят в движение грузы (Г1), (Г2) посредством рамки привода (П). Причем на Рис.10.3 инерцоид находится в фазе, когда пружины между (Т) и (П) сжимаются, а пружина между грузами расправляется. Чтобы смоделировать вращение грузов, после того как их центр тяжести окажется на одной линии вдоль оси (ОУ) с центром тяжести тележки можно представить, что при переходе грузами оси (ОУ) пружины мгновенно заменяются другими аналогичными пружинами, но работающими в противоположном направлении. После достижения «грузами» крайней левой относительно рисунка точки, можно опять представить соответствующую замену пружин и т. д. до завершения полного оборота грузов. Таким образом, получим эквивалентную схему реального привода вращения грузов в инерцоиде.

Привод обычно установлен на тележке и входит в общую массу тележки, поэтому будем считать, что масса рамки привода (П) и пружин, которые вместе собственно, и являются эквивалентом привода, сосредоточена в центре тяжести тележки (Цтт). Чтобы не загромождать рисунок схема действия сил показана на примере одного груза (Г1) и сил реакции, проявляющихся в процессе реактивного взаимодействия груза (Г1) и тележки (Т). Поскольку схема инерцоида абсолютно симметрична, то силы действующие на груз (Г2) и реакция на них тележки и рычагов зеркально симметричны относительно оси (ОХ) показанным силам. Нумерация четвертей выполнена по ходу движения груза (Г1) основным текстом. Учитывая, что груз (Г2) движется в противоположную сторону симметрично грузу (Г1) относительно оси (ОХ), то для груза (Г2) первой четвертью будет четвертая четверть на рисунке. Далее по ходу движения груза (Г2) нумерация четвертей для груза (Г2) обозначена в скобках.

На груз (Г1) действует **сила привода вдоль продольной оси** (-Fпх). Кроме того, со стороны рычага и части рамки (П), заключенной между грузами, на груз (Г1) действуют **сила реакции рычага** (Fр) и **сила привода (Fпу) вдоль поперечной оси (ОУ).** Чтобы определить результирующую силу, действующую вдоль оси (ОХ) на груз (Г1) сначала найдем равнодействующую сил реакции рычага (Fр) и привода (Fпу). Сложив их по правилу параллелограмма определим равнодействующую этих сил – **суммарную силу привода и реакции** (Fпрх). Затем определим равнодействующую всех сил, действующих на груз (Г1). Сложив по правилу параллелограмма силу (Fпрх) с силой (-Fпх) получим **силу окружную** (Fокр). Проекция силы (Fокр) на ось (ОХ) действует на груз (Г1) вдоль оси (ОХ) с **силой груза вдоль продольной оси** (Fгх). На общий центр тяжести грузов (Цтт) вдоль оси (ОХ) действует удвоенная сила грузов (2Fгх).

На тележку со стороны одного груза (Г1) действует **сила привода** (Fпх) и **сила реакции рычага** (-Fр). Кроме того, рычаги воздействуют на тележку с **силой привода** (±Fпу). Ответные на это воздействие силы реакции со стороны тележки это **силы реакции тележки** (Fрту) и (-Fрту). Эти силы равны по величине и противоположны по направлению и действуют вдоль одной линии. Следовательно, все силы, действующие на тележку вдоль оси (OY) со стороны грузов под действием привода или инерции грузов, взаимно компенсируются и их можно не учитывать.

По правилу параллелограмма определим равнодействующую силы реакции рычага и силы привода в центре тяжести тележки, т.е. **суммарную силу реакции и привода** (Fрп). Проекцией силы (Fрп) на ось (ОХ) является **сила тележки** (Fтх). Это сила, действующая на тележку при ее взаимодействии с одним грузом (Г1). Если учесть второй груз (Г2), то суммарная сила, действующая на тележку со стороны грузов будет равна удвоенной силе, действующей на тележку (Fтх) вдоль оси (ОХ), т.е. сила (2Fтх).

В соответствии с третьим законом Ньютона:

-2Fхг=+2Fхт

Время взаимодействия время (t) является общим для действия каждой из этих сил. Следовательно, импульсы сил, полученные тележкой и грузами вдоль оси (ОХ) в результате их реактивного сближения в первой четверти вращения грузов равны по величине и противоположны по направлению:

- t*2Fгх = + t*2Fтх

или:

- t*2Fгх + t*2Fтх = 0

Таким образом, в фазе реактивного сближения грузов и тележки в первой четверти вращения для каждого из грузов суммарное изменение импульса движения инерцоида относительно оси (ОХ) равно нулю. Это означает, что если остановить движение грузов и тележки при пересечении грузами поперечной оси (OY), жестко связанной с осью вращения грузов, то импульс замкнутой системы инерцоида также будет равен нулю.

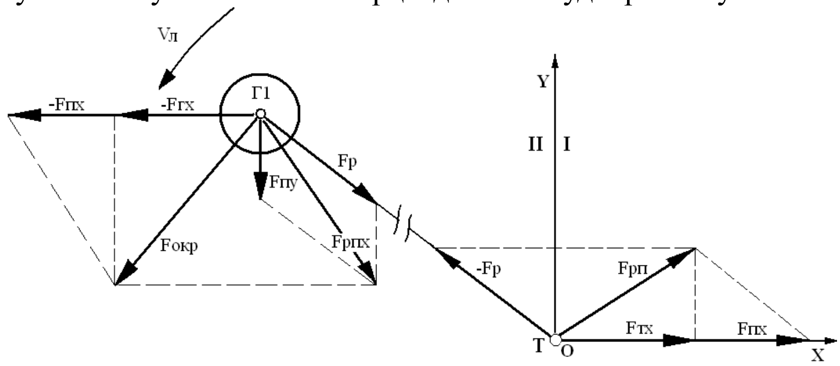


Рис. 10.4

Когда грузы пересекают ось (ОХ) и оказываются во второй четверти, наступает фаза реактивного расхождения грузов с тележкой. В механизме их реактивного взаимодействия с тележкой принципиально ничего не меняется. Поэтому суммарное изменение импульса движения инерцоида вдоль продольной оси при прохождении грузами второй четверти кругового движения также равно нулю (см. Рис. 10.4). В третьей четверти вновь наступает фаза реактивного сближения, а в четвертой – фаза реактивного расхождения.

Совершенно аналогично можно показать, что в каждой последующей четверти кругового движения тела «грузы» суммарный импульс движения инерцоида относительно оси (ОХ) за счет реактивного взаимодействия реальных масс без учёта инерции их движения не изменится. Следовательно, за полный оборот грузов в процессе их реактивного взаимодействия с тележкой без учёта влияния инерции кругового движения грузов, изменения импульса движения инерцоида вдоль оси (ОХ) не происходит, что соответствует классическому закону сохранения импульса. Что касается сохранения импульса при реактивном взаимодействии грузов и тележки относительно оси (OY), то здесь все гораздо проще.

По сути дела вдоль поперечной оси грузы через тело тележки и связующие рычаги взаимодействуют только **между собой**. В соответствии с классическим законом сохранения импульса общий импульс системы из двух одинаковых грузов при взаимодействии грузов между собой не изменяется. Следовательно, движение грузов вдоль оси (ОУ) не оказывает никакого влияния на движение тележки и инерцоида в целом в этом направлении. Рычаг груза (Г1) под действием силы привода (+Fпу) стремится переместиться вдоль поперечной оси в положительном направлении (см. Рис.10.3). Поэтому на левый конец рычага (Г1) действует ответная сила реакции тележки (-Fрту). Соответственно на левый конец рычага (Г2), который под действием силы привода (-Fпу) стремиться переместится вдоль поперечной оси (OY) в отрицательном направлении, действует сила реакции тележки (+Fрту). При этом силы привода (±Fпу) компенсируются силами реакции тележки (±Fрту). Общий импульс движения инерцоида вдоль поперечной оси при этом не изменяется. На рисунке 10.3 легко видеть, что все поперечные составляющие сил, действующих между грузами, взаимно компенсируются через общее тело тележки, т.к. они равны по величине и имеют противоположные направления относительно продольной оси симметрии инерцоида.

Силы, связанные с инерцией движения грузов на Рис. 10.3 не показаны. Однако с какой бы силой ни взаимодействовали между собой грузы, и какую бы инерцию они при этом ни приобретали - полная симметрия относительно оси (ОХ) при синфазном движении грузов по окружности в противоположных направлениях гарантирует полную взаимную компенсацию их воздействия на импульс движения инерцоида вдоль поперечной оси (ОУ). Таким образом, силы привода (±Fпу) и силы инерции движения грузов по окружности, действующие на тележку вдоль поперечной оси (OY) не приводят к реактивному движению тележки и изменению импульса движения инерцоида в целом вдоль поперечной оси (OY).

С учётом инерции движения по окружности каждого груза в отдельности характер взаимодействия между отдельными грузами и соответствующими им частями тележки изменяется. Дополнительная инерция движения грузов по окружности при взаимодействии их с соответствующими частями тележки приводит к изменению импульса движения инерцоида вдоль оси (ОХ).

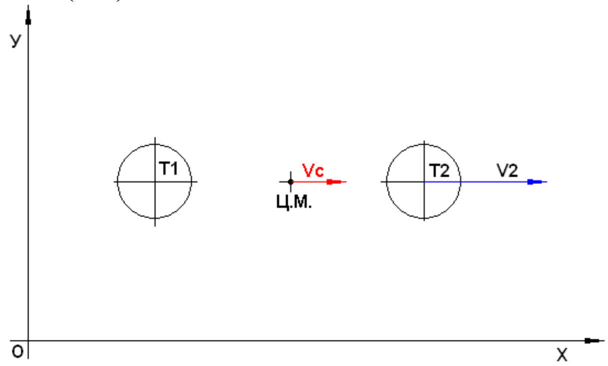


Рис. 10.5

Рассмотрим взаимодействие двух тел одинаковой массы (см. Рис. 10.5), в котором одно из тел (Т2) имеет дополнительную инерцию движения по сравнению с другим телом (Т1). Пусть до взаимодействия скорость тела (Т1) в абсолютной системе отсчёта (Х,О,У) равна нулю, а скорость тела (Т2) равна (V2). При взаимодействии тела (Т1) и (Т2) в ходе реактивного сближения или простом объединении тел (Т1) и (Т2) в общую систему тел силе привода при реактивном сближении или силе упругости связующего тела при объединении тел (Т1) и (Т2) в единую систему приходится преодолевать **разную** инерцию тел (Т1) и (Т2), хотя и имеющих одинаковую массу. Рассмотрим простое объединение тел (Т1) и (Т2) в общую систему через связующее тело., которое для простоты на Рис. 10.5 не показано.

В отношении тела (Т1) силе упругости связующего тела противодействует только инерция массы покоя тела (Т1), а в отношении тела (Т2) – ещё и дополнительная инерция движения тела (Т2), движущегося со скоростью (V2). Сила инерции массы покоя тела (Т1) при взаимодействии с телом (Т2) через связующее тело не может в полной мере противостоять суммарной инерции тела (Т2), включающей в себя кроме инерции массы покоя тела (Т2) ещё и инерцию движения тела (Т2). Поэтому часть инерции движения тела (Т2) через связующее тело передаётся телу (Т1) и, следовательно, всей системе (Ц. М.) счёт большего инерционного сопротивления тела (Т2) силам упругости связующего тела. При этом скорость системы равна половине скорости тела (Т2), т.е. (Vc=V2/2), т.к. массы покоя взаимодействующих тел (Т1) и Т2) одинаковые.

Инерция, как свойство сопротивления всякому изменению состояния движения тел зависит не только от количества вещества в теле, но и от сил противодействующих изменению движения, в том числе и от инерции движения в направлении противоположном воздействующей силе. То есть взаимодействие с телом, движущимся в направлении, противоположном оказываемому на него воздействию, эквивалентно взаимодействию с телом, имеющим большую общую массу, чем масса, эквивалентная только количеству вещества этого тела. Полная эквивалентная масса движущегося тела эквивалентна массе, которая оказывает инерционное сопротивление изменению состояния движения тела равное сумме инерционного сопротивления массы покоя тела и инерционного сопротивления движения тела. Таким образом, система из двух тел в полном соответствии с законом сохранения импульса всегда движется в сторону тела имеющего большую суммарную инерцию, в направлении, противоположном силе взаимодействия, действующей на тело.

Для образного представления **эквивалентности** дополнительного движения одного из взаимодействующих тел **увеличению** инерциальной массы тела, движущегося в направлении противоположном силе взаимодействия рассмотрим систему тел (Т1) и (Т2), имеющих до начала взаимодействия нулевую скорость движения в абсолютной системе координат (ХОУ). При этом пусть масса тела (Т2) имеет возможность гипотетическим образом изменяться относительно первоначальной массы, которая равна массе тела (Т1). Рассмотрим вначале изменение положения общего центра масс тел (Т1) и (Т2), не связанных между собой.

Если масса покоящегося тела (Т2) будет увеличиваться, то центр масс неподвижных тел (Т1) и (Т2) будет смещаться в сторону более массивного тела (Т2). Тот же самый эффект наблюдается и в отношении центра масс одинаковых тел (Т1) и (Т2) при движении тела (Т2) со скоростью (V2) относительно неподвижного тела (Т1). За счёт движения тела (Т2) со скоростью (V2) центр масс тел (Т1) и (Т2) перемещается в направлении движущегося тела (Т2) со скоростью (V2), как и в случае с увеличивающейся массой тела (Т2) при неподвижном положении обоих тел. Гипотетическое увеличение массы тела (Т2) во втором случае заменяется дополнительной инерцией движения тела (Т2). Таким образом, импульс движения одного из тел эквивалентен дополнительной массе этого тела, т.е. дополнительное количество движения эквивалентно дополнительному количеству вещества.

При объединении в общую систему неподвижных тел объединяются их массы покоя. При взаимодействии движущихся тел, кроме объединения их масс покоя, в общую систему объединяется и количество движении тел, которое в процессе выравнивания скоростей равномерно распределяется по всей массе объединённой системы. Кинетическая энергия взаимодействующих тел, проявляющаяся в процессе взаимодействия, как дополнительная масса взаимодействующих тел, после объединения тел в единую систему вновь преобразуется в кинетическую энергию движения теперь уже всей системы. В этом и заключается физический смысл закона сохранения импульса.

Полная **инерциальная** масса движущегося тела при возможном взаимодействии тела с другим телом, как мы уже отмечали, равна сумме массы, эквивалентной количеству вещества в теле и «массы», эквивалентной инерциальному сопротивлению движущегося тела силам взаимодействия между телами. Однако в отсутствии взаимодействий масса любого тела эквивалентна только количеству вещества в теле, с какой бы скоростью оно не двигалось, т.е. «дополнительная масса» движущегося тела проявляется только при взаимодействии тел, точно также как и перераспределение импульса в соответствии с законом сохранения импульса происходит только при взаимодействии тел.

Схема движения объединённой системы тел (Т1) и (Т2) с точки зрения полных инерциальных масс взаимодействующих тел полностью эквивалентна движению системы тел (Т1) и (Т2) в классическом представлении или по крайней мере ни в чём не проигрывает классической модели. Обе модели опираются на один и тот же принцип – закон сохранения импульса. Однако в нашей модели предпринята попытка объяснить физический механизм перераспределения импульса за счёт полного инерциального сопротивления взаимодействующих тел силам, вызывающим эти взаимодействия.

Таким образом, если возможно в замкнутой системе получить дополнительную кинетическую энергию частей системы без изменения импульса системы, то при взаимодействии неподвижной части системы с её подвижными частями можно изменить импульс всей системы в полном соответствии с законом сохранения импульса. Рассмотрим физический механизм образования импульса движения инерцоида в результате реактивного взаимодействия грузов и тележки, имеющих **разную** суммарную инерцию движения, а, следовательно, и разную инерциальную массу на примере модели инерцоида, изображённого на Рис. 10.6.1. Чтобы наиболее наглядно смоделировать процесс получения грузами дополнительной инерции движения без изменения импульса инерцоида вдоль любой из осей предположим, что движение грузам сообщено кратковременным взрывом.

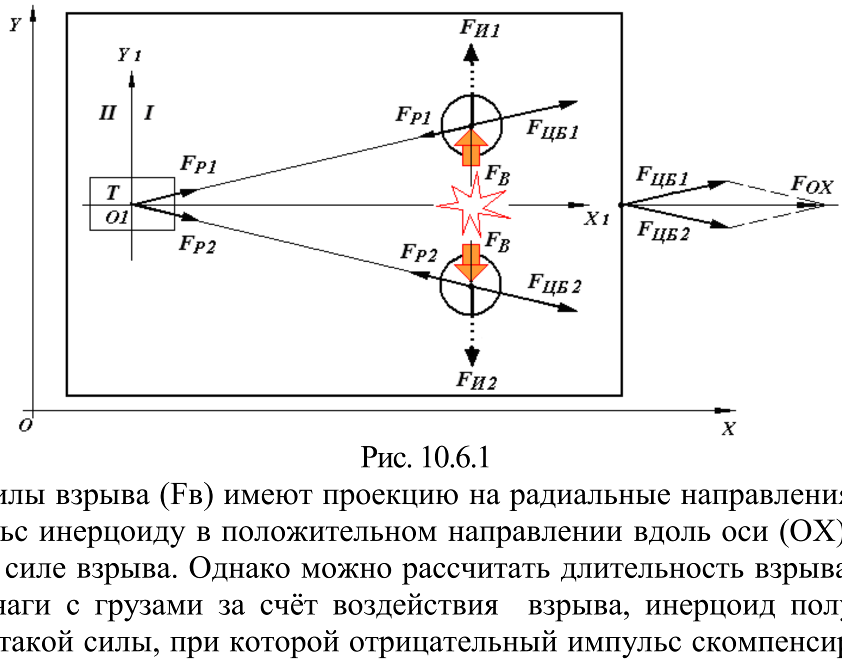


Рис. 10.6.1

На рисунке 10.6.1 силы взрыва (Fв) имеют проекцию на радиальные направления вдоль рычагов, что изначально задаёт импульс инерцоиду в положительном направлении вдоль оси (ОХ) за счёт внешней по отношению к инерцоиду силе взрыва. Однако можно рассчитать длительность взрыва таким образом, что через разошедшиеся рычаги с грузами за счёт воздействия взрыва, инерцоид получит отрицательный импульс вдоль оси (ОХ) такой силы, при которой отрицательный импульс скомпенсирует положительный импульс, полученный инерцоидом в начале взрыва. Чтобы исключить влияние взрыва на импульс инерцоида через тележку предположим, что взрыв вдоль продольной оси далеко не распространяется и на тележку не воздействует. Технические решения для этого реально существуют. Например, можно заключить взрыв в цилиндр, высота которого расположена параллельно оси (ОУ) и т.п.

Таким образом, во время взрыва на каждый груз действует сила взрыва (Fв), направленная вдоль оси (OY) во взаимно противоположных направлениях. Поэтому импульс инерцоида вдоль оси (OY) без учёта инерции движения грузов под действием взрыва (привода) не изменится. Поскольку взаимодействие грузов осуществляется вдоль оси (OY), то импульс инерцоида вдоль оси (OX) также не изменится. То есть дополнительная инерция движения грузов в предложенной модели получена грузами без изменения общего импульса инерцоида. После окончания действия взрыва (привода) дальнейшее движение грузов происходит только по инерции. При этом взаимодействие грузов, имеющих дополнительную инерцию движения с соответствующими им неподвижными частями тележки, приводит к изменению импульса инерцоида без вмешательства внешних по отношению к системе сил.

Прямолинейное движение грузов вдоль оси (ОУ), полученное грузами в результате действия взрыва (привода) в условиях взаимодействия грузов с центром вращения через связующие рычаги преобразуется в движение грузов по окружности относительно их общего центра вращения, находящегося на тележке. В процессе образования вращательного движения возникает центробежная сила (Fцб), т.е. проекция силы инерции дополнительного движения грузов по окружности на радиальное направление, которая и является **движущей силой** поступательного движения инерцоида. Поскольку первоначальное прямолинейное движение получено грузами без изменения импульса всей системы инерцоида, то центробежная сила является внешней силой по отношению к инерцоиду, подобно внешней силе взрыва, которая могла бы сообщить импульс инерцоиду в положительном направлении оси (OX), если бы не было принято оговоренных нами мер.

Изменение импульса движения инерцоида за счёт центробежной силы происходит в процессе реактивного взаимодействия грузов и тележки через силу упругости рычагов. За счёт центробежной силы грузы оказывают дополнительное сопротивление силам упругости рычагов, осуществляющих реактивное сближение грузов и тележки. В то время как в отношении тележки силе упругости рычагов противодействует только инерция массы покоя тележки. Дополнительное инерционное сопротивление грузов за счёт центробежной силы эквивалентно увеличению инерциальной массы грузов. Следовательно, при реактивном взаимодействии движущихся грузов и неподвижной тележки грузы получат меньшую скорость движения в сторону тележки, чем тележка в сторону грузов. В результате до максимального сближения грузов и тележки вдоль оси (OX) тележка пройдёт большее расстояние, чем грузы, т.е. общий центр масс инерцоида сместится в положительном направлении вдоль оси (OX).

При аналогичном взаимодействии неподвижного тела эквивалентного по массе двум грузам с неподвижной тележкой импульс системы не изменится, т.е. поступательного движения не произойдёт. Источником дополнительного импульса движения инерцоида является дополнительный импульс движения по окружности каждого груза в отдельности, который они приобретают без изменения общего импульса движения инерцоида. Тележка взаимодействует одновременно с двумя одинаковыми грузами, поэтому на каждый груз во взаимодействии с тележкой условно приходится только половина массы тележки равная по величине массе одного груза. Благодаря некоторой степени свободы движения грузов относительно друг друга каждая часть тележки соответствующая отдельному грузу в узком смысле взаимодействует только со своим грузом, а не со всей системой грузов в целом, в которой внутреннее движение взаимно скомпенсировано. Таким образом, условные части тележки реально взаимодействуют с движущимися грузами.

Определяющим фактором в каждом из этих взаимодействий является превышение за счёт центробежной силы суммарной инерции каждого движущегося по окружности груза по отношению к инерции соответствующей ему ответной неподвижной части тележки, определяющейся только количеством вещества ответной части. Следовательно, импульс движения каждой условной половины инерцоида, состоящей из одного груза и соответствующей ему части тележки изменяется в сторону груза, имеющего большую суммарную инерцию. Поскольку грузы в любой момент времени одновременно находятся по **одну сторону** от поперечной оси инерцоида симметрично его продольной оси за исключением момента пересечения поперечной оси, то в **эту же сторону** изменяется и импульс инерцоида в целом, который равен геометрической сумме импульсов условных половинок инерцоида.

Таким образом, система тел инерцоида и система тел (Т1) и (Т2), представленная на Рис. 10.5, одинаково с физической точки зрения движутся в сторону тела, имеющего наибольшую суммарную инерцию. Движение системы тел (Т1) и (Т2) в схеме взаимодействия тел, представленной на Рис. 10.5, в которой избыточная инерция движения тела (Т2) по сравнению с телом (Т1) сообщена телу (Т2) за счёт внешнего импульса ничем принципиально не отличается от движения инерцоида, хотя избыточная инерция движения грузов формально приобретена внутри системы инерцоида. И в том и в другом случае система тел движется в сторону тела, имеющего наибольшую суммарную инерцию. Единственное отличие заключается в способе получения дополнительной инерции движения одного из взаимодействующих тел в каждой из рассматриваемых систем.

Дополнительная инерция тела (Т2) в системе тел (Т1) и (Т2) получена за счёт внешнего импульса, поэтому считается, что система тел (Т1) и (Т2) движется на законном основании. В то время как дополнительная инерция грузов инерцоида получена за счёт взаимодействия грузов между собой внутри замкнутой системы инерцоида, поэтому в движении инерцоида за счёт дополнительной инерции грузов усматривается нарушение закона сохранения импульса. Однако, как мы выяснили, дополнительный импульс движения грузов фактически является внешним по отношению к тележке, т.к. разгон грузов происходит внутри практически независимой системы, состоящей только из самих грузов. Внутренним для системы инерцоида в целом дополнительный импульс грузов является только формально. Грузы и тележка объединяются в общую систему только с началом преобразования прямолинейного движения грузов в движение по окружности, когда тележка взаимодействует с уже движущимися грузами.

Реально грузы и тележка механически жестко связаны между собой, поэтому описанный механизм достаточно сложно представить. Рассмотрим взаимодействие тел, изображённых на Рис. 10.6.2. Рисунок 10.6.2 практически аналогичен Рис. 10.6.1 с той лишь разницей, что на Рис. 10.6.2 подвижные тела второй подсистемы связаны с неподвижным первым телом гибкими тягами верёвочного типа. В такой схеме легко видеть, что разгон грузов происходит в независимой системе «грузы», а взаимодействие с тележкой начинается только в момент изменения направления прямолинейного движения грузов, когда кроме масс покоя взаимодействующих тел во взаимодействие вмешивается внешняя для системы инерцоида центробежная сила.

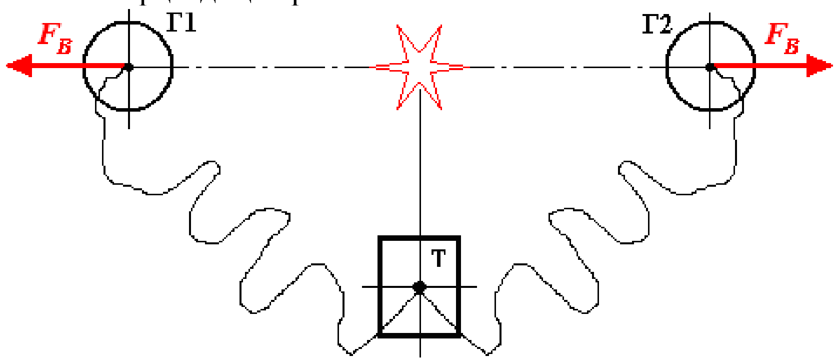


Рис. 10.6.2

До тех пор, пока верёвочные тяги не выберут слабину за счёт прямолинейного движения грузов, тележка остаётся неподвижной. Однако когда слабина выбрана, тележка через натянутые тяги вступает во взаимодействие с уже движущимися грузами, в результате чего импульс всей системы изменяется в сторону грузов. Таким образом, импульс движения, рождённый внутри единой механической системы, может оказаться **внешним** для этой же системы, в результате чего импульс движения замкнутой системы может изменяться без взаимодействия с внешней средой и без нарушения закона сохранения импульса. Конечно же, жесткие рычаги практически мгновенно передают воздействие на тележку, что снижает эффективность разгона грузов, но физический механизм взаимодействия при этом принципиально не изменяется. Зато при помощи жестких рычагов можно легко управлять угловой скоростью вращения грузов.

Закон сохранения импульса, безусловно, является фундаментальным базовым законом природы, и ни о каких нарушениях его в физическом мире не может быть и речи. Однако движение инерцоида происходит не вопреки закону сохранения импульса, как утверждают скептики, а в полном соответствии с законом сохранения импульса и только благодаря существованию закона сохранения импульса. Некоторые исследователи придерживаются мнения, что «безопорное» движение осуществляется за счёт взаимодействия с пространством (с физическим вакуумом или гипотетическими полями кручения). Однако если бы взаимодействие макротел с «физическим вакуумом» обнаруживалось бы на таких низких скоростях, с которыми движутся грузы инерцоида, то любое движение в макромире было бы практически невозможно из-за вязкости «физического вакуума».

Изменение импульса инерцоида под действием центробежной силы грузов проявляется настолько выражено, что вряд ли может вызвать у кого-либо какие-либо серьёзные возражения. Возвратно-поступательные колебания инерцоида вдоль продольной оси, которые отмечают все без исключения наблюдатели, и есть изменение импульса инерцоида за счёт центробежной силы в пределах каждого полуоборота грузов. Таким образом, вопрос поступательного безопорного движения инерцоида заключается лишь в возможности или невозможности неполной компенсации центробежной силы относительно продольной оси (ОУ) в противоположных полуплоскостях по ходу движения в пределах каждого полного оборота грузов. Однако, если изменение импульса замкнутой системы инерцоида за счёт внутренних взаимодействий, всё же возможно, хотя бы в пределах одного полуоборота грузов, что достаточно очевидно, то возможность управления этим импульсом это уже дело техники.

При неизменной угловой скорости вращения грузов сила инерции, возникающая при изменении направления движения грузов по окружности, оказывает одинаковое суммарное воздействие на тележку в противоположных полуплоскостях вдоль любого направления в пределах каждого оборота грузов. Однако центробежная сила инерции зависит от линейной скорости движения грузов по окружности. Следовательно, величина изменения импульса инерцоида зависит от скорости движения грузов вдоль окружности. Изменяя скорость вращения грузов в противоположных полуплоскостях относительно выбранного направления, можно управлять изменением импульса инерцоида вдоль выбранного направления. Увеличивая скорость вращения грузов в передней полуплоскости относительно выбранного направления и снижая ее в противоположной полуплоскости можно получить устойчивое изменение импульса инерцоида в заданном направлении.

Таким образом, для поступательного движения инерцоида необходимо лишь соответствующим образом управлять угловой скоростью движения грузов по окружности в пределах каждого оборота грузов. При этом реактивное взаимодействие грузов и тележки за счёт активного привода в «чистом виде», т.е. взаимодействие на уровне масс покоя не приводит к изменению импульса инерцоида. Зоны разгона и торможения показаны на Рис. 10.1. Цвет зоны соответствует цвету разгоняемого или затормаживаемого в этой зоне груза.

В научной среде центробежную силу часто называют фиктивной. Возможно, это объясняется тем, что центробежная сила действует только в процессе изменения направления движения, но сама центробежная сила с классической точки зрения не сообщает радиального движения вращающемуся телу на макроуровне. Если разорвать связь движущегося по окружности тела с центром вращения во время вращательного движения, то с классической точки зрения вращающееся тело будет продолжать прямолинейное движение не в радиальном направлении, в котором действовала центробежная сила, а по касательной к траектории движения грузов. Наверное, поэтому вызывает недоверие возможность увлечения инерцоида центробежной силой.

Из рассмотренного выше механизма вращательного движения с жестко закрепленным или уравновешенным центром вращения следует, что энергия вращения не расходуется, а только претерпевает преобразование из кинетической энергии в потенциальную энергию и обратно. Поэтому в отсутствии трения вращение должно осуществляться бесконечно долго. Инерцоид же без подвода энергии очень быстро останавливается, т.к. энергия движения грузов по окружности расходуется на реактивное движение грузов и тележки и изменение импульса инерцоида в целом.

Поскольку энергия вращения грузов расходуется, импульс движения инерцоида вдоль оси (OX), полученный за счет силы инерции грузов, по абсолютной величине в каждой последующей точке кругового движения грузов будет меньше импульса движения инерцоида в предыдущей точке взаимодействия. Замедление вращения грузов и как следствие уменьшение центробежной силы по абсолютной величине происходит, прежде всего, за счет потери кинетической энергии вращения грузов, потраченной на поступательное движение инерцоида. Таким образом, изменение импульса инерцоида за счет силы инерции грузов при вращательном движении по инерции без подпитки энергией будет постоянно убывать. Однако замедление вращения грузов приводит к самостоятельному поступательному движению инерцоида в сторону, в которую в зависимости от фазы кругового движения будет первоначально изменен его импульс при наибольшей скорости движения грузов.

Если, например, наибольшая скорость движения грузов была в правой полуплоскости, то до полной остановки вращательного движения инерцоид будет двигаться поступательно вправо по следующей причине. В первой четверти кругового движения грузов скорость вращения наибольшая. Изменение импульса инерцоида направлено в сторону грузов, т.е. вправо. В следующей четверти кругового движения изменение импульса инерцоида направлено влево. Однако скорость вращения во второй четверти меньше скорости вращения в первой четверти. Значит, общее изменение импульса инерцоида будет по-прежнему вправо. В третьей и четвертой четвертях кругового движения грузов, т.е. в нижней полуплоскости изменение импульса инерцоида будет влево, т.к. скорость движения грузов в третьей четверти больше чем в четвертой четверти. Однако скорость движения грузов в нижней полуплоскости в целом меньше скорости движения груза в верхней полуплоскости. Поэтому за каждый оборот грузов инерцоид будет передвигаться поступательно вправо.

Таким образом, вращательное движение двух синхронно вращающихся навстречу друг другу грузов с незакрепленным в пространстве центром вращения преобразуется в прямолинейное поступательное движение естественным образом.

Ранее мы выяснили, что вращательное и прямолинейное движения обратимы. При «захвате» тела связующим телом с закрепленным концом прямолинейное движение преобразуется во вращательное движение. При освобождении «захвата» движение тела вновь становится прямолинейным. Из сказанного выше следует, что вращательное движение с незакрепленным в пространстве центром вращения синхронно вращающихся навстречу друг другу тел так же обратимо. В пассивном инерцоиде, т.е. в инерцоиде без подвода дополнительной энергии вращательное движение естественным образом преобразуется в прямолинейное поступательное движение.

Переход от вращательного движения к прямолинейному движению и в том и в другом случае сопровождается потерей энергии вращательного движения. При переходе от равномерного вращательного движения с закрепленным центром вращения к прямолинейному движению теряется энергия остаточной деформации. В инерцоиде с «незакрепленным» центром вращения при переходе к прямолинейному движению большая часть энергии вращения расходуется на реактивное колебательное движение. Т.е. коэффициент полезного действия пассивного инерцоида очень низок. А с учетом подчас не горизонтальности и не плоскостности поверхности под инерцоидом и сил трения, которые не только не участвуют в создании поступательного безопорного движения, а наоборот препятствуют ему, перемещение пассивного инерцоида вообще сложно зафиксировать.

Поступательное перемещение пассивного инерцоида сложно осуществимо ещё и потому что скорость движения грузов по окружности без принудительного вмешательства изменяется достаточно равномерно, а не в наиболее эффективных для этого зонах. Для повышения эффективности поступательного движения инерцоидов необходимо увеличивать скорость вращения грузов в передней полуплоскости и уменьшать скорость вращения грузов в задней полуплоскости инерцоида. Теоретически разгонять и тормозить грузы можно во всей зоне соответствующей полуплоскости разгона или торможения. Практически же при управлении вращением грузов необходимо учитывать следующие обстоятельства:

Во-первых: в областях близких к поперечной оси инерцоида эффективность влияния инерции движения грузов на изменение импульса движения инерцоида очень низкая. В областях, находящихся в непосредственной близости к оси (OY) изменение импульса инерцоида вдоль оси (OX) незначительно. В момент пересечения грузами оси (OY) влияние инерции движения грузов на импульс инерцоида вообще равно нулю, т.к. равнодействующая центробежных сил двух грузов вдоль оси (ОУ) и вдоль оси (OX) при этом равна нулю. Напротив, при небольших углах между рычагами и осью (OX) результирующая центробежная сила инерции грузов (Fox), направленная вдоль оси (OX) имеет наибольшее значение, следовательно, при движении грузов в зоне, непосредственно прилегающей к оси (OX) происходит наибольшее изменение импульса инерцоида вдоль оси (OX). Поэтому разгон необходимо производить в центральной части передней полуокружности разгона, а торможение в центральной части задней полуокружности торможения, где действие силы инерции грузов на изменение импульса движения инерцоида наиболее эффективно. Равнодействующая центробежных сил двух грузов вдоль оси (ОУ) при любом угловом расположении грузов относительно любой оси равна нулю и не влияет на изменение импульса инерцоида.

Во-вторых: высокую или низкую скорость грузов в полуплоскостях разгона и торможения соответственно из-за инерционности движения грузов будет очень сложно изменить при переходе из полуплоскости разгона в полуплоскость торможения и наоборот. Тем более что в наиболее эффективной части зоны торможения скорость вращения должна быть не просто равна скорости вращения до начала разгона, а по возможности значительно меньше скорости вращения грузов в зоне разгона. То же самое можно сказать и об изменении скорости при переходе из зоны торможения в зону разгона, где скорость вращения должна быть по возможности значительно больше, чем в зоне торможения. Поэтому, учитывая инерционность грузов, разгон и торможение необходимо осуществлять в достаточно узких секторах, прилегающих непосредственно к продольной оси (OX).

В-третьих: активные разгон или торможение в областях близких к поперечной оси инерцоида приводит к наиболее сильному реактивному взаимодействию грузов и тележки вдоль оси (OX), т.к. скорость движения грузов в этих областях имеет наибольшую проекцию на продольную ось (OX). При этом сильные реактивные колебания будут мешать поступательному движению. Поэтому желательно, чтобы эту зону грузы проходили по инерции, с не самой большой скоростью вращения. Практически сектор разгона и сектор торможения составляет около 30^0. Примерно в таких же по величине секторах управляется и инерцоид В. Н. Толчина (см. Рис.10.1). Г. И. Шипов экспериментально установил оптимальные значения секторов разгона и торможения, которые примерно совпадают с указанными значениями. Такой размер и расположение реальных зон разгона и торможения обеспечивает наибольшую разность скоростей движения грузов в полуплоскостях разгона и торможения в наиболее эффективных их областях и, следовательно, наибольшую тягу инерцоида. Однако Шипов теоретически не обосновал причину такого выбора секторов разгона и торможения.

Относительную эффективность активного инерцоида можно проиллюстрировать на следующем примере. Пусть величина скорости вращения грузов в передней полуплоскости инерцоида увеличилась в среднем вдвое по сравнению со скоростью вращения грузов в задней полуплоскости. Соответственно центробежное ускорение и центробежная сила в передней полуплоскости увеличатся в четыре раза, а время воздействия уменьшится только в два раза, что эквивалентно увеличению центробежной силы вдвое при неизменном времени воздействия. Следовательно, за каждый оборот грузов дополнительный импульс движения инерцоида в передней полуплоскости будет вдвое превышать дополнительный импульс движения инерцоида в противоположную сторону по сравнению с импульсом, полученным инерцоидом при неизменной скорости движения грузов.

Количественно учесть силу тяги инерцоида довольно сложно. Поскольку сложно определить какая часть центробежной силы передается в виде импульса движения центру масс инерцоида, какая часть центробежной силы затрачивается на реактивное движение грузов и тележки и какая ее часть остается во вращательном движении грузов. Но принципиально никаких препятствий для таких расчетов нет, поскольку движение инерцоида происходит в полном соответствии с третьим законом Ньютона, законом сохранения импульса и законом сохранения энергии.

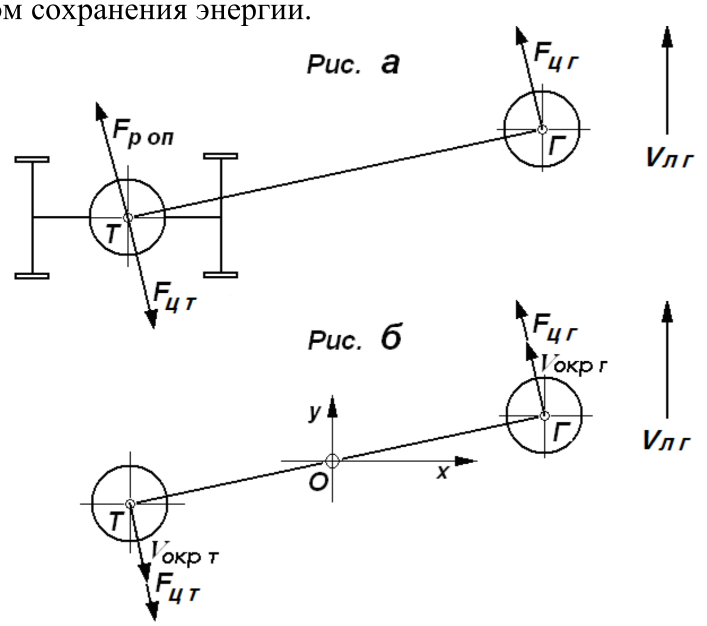


Рис. 10.7

Кроме рассмотренной конструкции инерцоида с двумя грузами существует еще одна реально действующая конструкция инерцоида с одним вращающимся грузом, в которой в отличие от рассмотренной конструкции компенсации сил взаимодействия относительно поперечной оси (OY) внутри системы не происходит (см. Рис.10.7).

Импульс инерцоида с двумя грузами, вращающимися в противоположных направлениях, в соответствии с рассмотренным механизмом изменяется за счет увеличения эквивалентной инерциальной массы грузов, имеющих большую кинетическую энергию движения по сравнению с тележкой. Увеличение инерциального сопротивления движению грузов, а, следовательно, и эквивалентной массы грузов при их реактивном взаимодействии с тележкой, происходит за счет центробежной силы, возникающей при движении грузов по окружности под (Fцг).

В инерцоиде с двумя грузами центробежная сила действует только по отношению к грузам. Симметричное движение грузов относительно продольной оси (OX) приводит к компенсации центробежной силы относительно оси (OY). Центробежная сила, действующая на грузы, вдоль оси (OX) остается не скомпенсированной, т.к. грузы одновременно находятся по одну сторону относительно оси (OY), что приводит к изменению импульса движения инерцоида с двумя вращающимися грузами за счет силы инерции движения грузов.

На рисунке 10.7а изображен инерцоид с одним грузом. Эквивалентная схема инерцоида представлена на Рис. 10.7б. Как и в предыдущем случае, масса груза равна массе тележки. Предположим, что груз (Г) приобрел инерцию движения со линейной скоростью (Vлг) вдоль поперечной оси (OY). Тележка (Т) при этом остаётся неподвижной.

При движении какого-либо тела относительно другого в отсутствии третьего тела, нет смысла определять какое из тел движется. Если связать систему отсчета с тележкой, то движется груз. Если система отсчета связана с грузом, то движется тележка. В общем случае есть только относительное движение между грузом и тележкой, которое одинаково относится как к грузу, так и к тележке. Кинетическая энергия относительного движения является общей для груза и тележки. Если груз и тележку соединить во время относительного движения рычагом, то в соответствии с законом сохранения импульса на каждое из взаимодействующих тел будет действовать половина общей кинетической энергии. В соответствии с третьим законом Ньютона на каждое из тел будет действовать одинаковая центробежная сила:

Fц г = - Fц т

При условии равенства масс груза и тележки каждое из тел получит одинаковую окружную скорость относительно геометрического центра вращения (O), находящегося посредине рычага, равную половине скорости (Vлг):

Vокр г = - Vокр т = $|{}^{1}/_{2}$Vлг$|$

Следовательно, на каждое из тел будет действовать одинаковая по величине, но противоположная по направлению центробежная сила. Импульс движения инерцоида при реактивном взаимодействии груза и тележки не изменится, т.к. суммарная инерция движения груза и тележки одинакова. Движение инерцоида в этом случае может осуществляться только за счет внешней силы. Внешней силой, сообщающей движение инерцоиду, является сила реакции опоры (сила трения). В идеальном случае сила реакции опоры (Fр оп) равна по величине и противоположна по направлению центробежной силе тележки:

Fр оп = - Fц т

Поскольку:

Fр оп + (- Fц т) = 0,

то окружная скорость тележки также равна нулю:

Vокр т = 0

Следовательно, эквивалентная масса груза с учетом инерции его движения будет больше реальной массы груза, в то время как масса тележки остается неизменной, что приведет к изменению импульса движения инерцоида при реактивном взаимодействии груза и тележки. В дальнейшем механизм движения инерцоида с одним вращающимся грузом аналогичен механизму движения инерцоида с двумя грузами. Разница состоит лишь в том, что поступательное движение инерцоида с одним грузом будет осуществляться за счет внешней для системы силы трения. Причем полная компенсация окружной силы тележки необязательна. Любое уменьшение (Fц т) за счёт силы трения приведет к изменению импульса такого инерцоида.

Рассмотрим работу некоторых предложенных разными конструкторами схем инерцоидов с учетом изложенного механизма безопорного движения:

На Рис.10.8 изображен инерцоид К. Э. Циолковского. В 1873 году у К.Э. Циолковского, 16-летнего подростка, учившегося самостоятельно, появилась идея центробежного механизма, который состоял из привода и двух перевернутых маятников, принудительно циркулирующих вверх-вниз. При дальнейшем размышлении будущий основоположник современной космонавтики отказался от своей идеи.

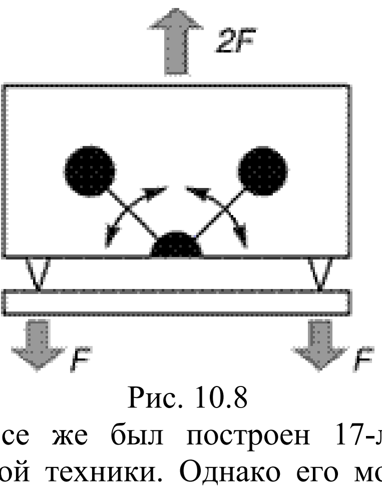


Рис. 10.8

В 1899 году подобный аппарат все же был построен 17-летним американцем Р. Годдардом, впоследствии одним из пионеров ракетной техники. Однако его модель не заработала. Возвращаясь к машине подобного типа, П. Колосов из Томской области полагает, что центробежные силы реальны и устройства, работающие на их основе, смогут заменить самолеты.

Против такой модели инерцоидов есть стандартные возражения противников. В инерцоиде К. Э. Циолковского не учтено равное действие сил, прижимающих аппарат к земле при ускорении грузов. Противники считают, что аппарат может только подпрыгнуть, оттолкнувшись от земли, но в воздухе опоры нет.

В соответствии с изложенным механизмом работы инерцоидов разгон и торможение не влияют на изменение суммарного импульса инерцоидов. Реактивное взаимодействие реальных масс грузов и тележки взаимно компенсируется. Поэтому теоретически центробежная сила в инерцоиде Циолковского все же будет создавать тягу, хотя сама конструкция очень не эффективна.

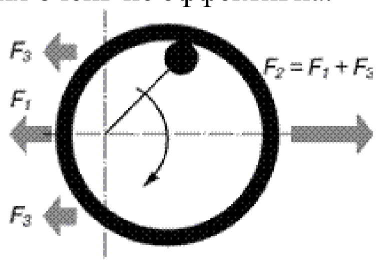


Рис.10.9

На Рис.10.9 изображен инерцоид с изменяемой длиной рычагов. В. Околотин комментирует такую конструкцию следующим образом: «При росте длины плеча и постоянных оборотах центробежные силы вырастут, но их уравновесят силы реакции в приводе».

Это стандартный аргумент противников безопорного движения или пример голословного отрицания в отсутствии понимания сути проблемы и какого-либо желания разобраться в ней. В. Околотин хорошо знает школьный курс физики. Силы реакции реактивного взаимодействия реальных масс, конечно же, уравновешивают друг друга, причем не только в данной конструкции, а при любом реактивном взаимодействии в любой конструкции. В любом действующем инерцоиде силы реакции уравновешены, но при этом инерцоид, тем не менее, изменяет импульс своего движения за счет инерции движения грузов эквивалентной увеличению их инертной массы.

Изменение импульса инерцоида происходит за счет разницы центробежных сил в полуплоскостях, разделенных поперечной осью инерцоида. И в данной конструкции центробежные силы уравновешиваются не реакцией привода. Приведем простой количественный расчет. Пусть величина радиусов вращения грузов в передней полуплоскости инерцоида увеличилась вдвое по сравнению с радиусом вращения грузов в задней полуплоскости. Соответственно центробежное ускорение и центробежная сила в передней полуплоскости увеличатся вдвое, но при этом время воздействия центробежной силы также уменьшится ровно вдвое. Следовательно, за каждый оборот грузов импульс силы в обеих полуплоскостях будет одинаковый.

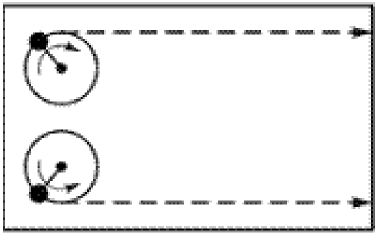


Рис. 10.10

В центрифугальном космолете Ф. Сулимкина (Рис.10.10) по мнению автора, тяга появляется при встречной раскрутке масс или при ударе брошенных масс в торец корабля. Можно использовать эти силы порознь или вместе.

При ускоряющейся раскрутке тяга появится точно так же, как она появляется при замедлении вращения. Но замедлять или ускорять вращение в непрерывном режиме можно очень ограниченное время.

Причем в непрерывном равномерном режиме замедления или ускорения вращения разность центробежной силы в диаметральных точках окружности вдоль оси движения будет незначительна, т.е. космолета из данной конструкции не получится. А бросание масс это чисто реактивное взаимодействие, которое не влияет на изменение импульса движения системы. Брошенные массы, конечно же, сообщат импульс движения в сторону их полета, но он только скомпенсирует импульс, полученный при движении этих масс в противоположной полуплоскости.

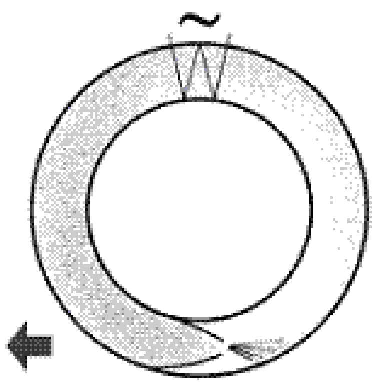


Рис.10.11

Р. Чуркин (Московская обл.) а.с. №365938 предложил создать параметрический инерционный привод в виде жесткого замкнутого трубопровода (Рис.10.11), частично заполненного вязкой электропроводной массой. Эта масса толкается электромагнитным полем и, проходя мембрану с пневматическим дросселем, должна создать направленное импульсное поступательное движение. В этом инерцоиде принцип безопорного движения соблюдён в смысле разности скорости движения в разных полуплоскостях, но будет ли такой инерцоид реально двигаться можно определить только просчитав массу электропроводного вещества в каждой полуплоскости. Причем если удастся соблюсти баланс масс в разных полуплоскостях, инерцоид Чуркина будет двигаться в сторону, противоположную той, что показана на рисунке. В том виде как это задумал сам автор - это чисто реактивное движение внутри замкнутой системы, которое не изменяет импульс системы.

В целом же, на наш взгляд, никакого противоречия с законами Ньютона и законом сохранения импульса в безопорном движении нет. Вращательное движение само по себе представляет загадку. Оно одновременно является и равноускоренным движением и равномерным движением. Вращательное движение характеризуется центростремительным ускорением и в то же время движение к центру в нем отсутствует. Все эти кажущиеся на первый взгляд противоречия не у кого не вызывают вопросов, потому что вращательное движение существует и никто не сможет этого отрицать. Его худо-бедно описали, установили количественные зависимости и на этом успокоились. И никто не попытался установить физическую сущность вращательного движения.

Кинематика рассматривает законы движения без установления причин, вызывающих это движение. Динамика, казалось бы, должна установить причины и механизм возникновения вращательного движения, но все опять ограничивается количественным описанием сил и моментов сил. Когда проявился новый феномен вращательного движения, демонстрируемый инерцоидами, ученые-физики восприняли его как нарушение фундаментальных законов природы. Хотя феномен безопорного движения не более противоречив, чем все остальные кажущиеся противоречия вращательного движения. Этот феномен трудно наблюдать в обычной повседневной действительности потому что:

Во-первых: устройств типа инерцоидов в природе в чистом виде не существует, хотя отдельные элементы безопорного движения, по-видимому, встречаются. Например, при падении вперед человек инстинктивно отбрасывает руки назад и сообщает им ускоренное вращательное движение.

Во-вторых: существующие в технике устройства довольно часто содержат механизмы, напоминающие конструкцию инерцоидов. Но разглядеть среди множества мешающих факторов преобразование вращательного движения в поступательное очень сложно. Действительно наблюдать явление безопорного движения в природе очень трудно, однако с появлением инерцоидов отмахиваться от этого явления нельзя. Нарушения законов природы не может быть в принципе. Все, что происходит в природе, происходит только в соответствии с законами природы или не происходит вообще. Нарушения могут быть только в нашем понимании законов природы, а понимание бывает не всегда. Закон сохранения импульса справедлив и для реальных масс и для эквивалентных масс, но при определении общего изменения импульса необходимо рассматривать эквивалентные массы с учетом инерции движения взаимодействующих тел.

Вот что пишет по поводу инерцоидов и безопорного движения на сайте N-T.ru В. Околотин:

«Многие века люди относились к массивным телам как своеобразным складам движения – сколько в них вложишь, столько и вернешь. Но вот родилась дерзкая надежда превратить склады в источники: нельзя ли так пошевелить грузами на тележке, чтобы та поехала сама собой, за счет внутренних сил?
Такие экипажи можно называть по-разному: инерцоидами, дебалансными механизмами, безопорными движителями... Заставить инерцию работать – дело полезное, однако сама возможность создания безопорных движителей предельно сомнительна.
Сначала слово энтузиастам. Например, вот что говорит, обрисовывая сложное положение по нестандартной поисковой проблеме инерцоидов, Б. Романенко (г. Химки Московской обл.), организатор и руководитель общественной лаборатории механоинверсии: «Сейчас нас 120 человек. Мы не можем ждать, пока появится кто-то, кто нам все разъяснит и укажет истину. Тем более что пока ничего вразумительного по теории инерции слышать не приходилось. Одни говорят, что центробежные силы (ЦБС) есть, другие их отрицают. Теория эта запутанна, во многом непонятна. Поэтому приходится надеяться на свой инженерный опыт, на свои руки и головы. Мы работаем, думаем, строим модели вот уже в течение 15 лет...».

А вот как описывает состояние дел инженер М. Денисов из города Рудного Кустанайской области: «О силах инерции прошли две широкие дискуссии, опубликовано немало статей и книг, но ясность все еще не достигнута. Изобретатели не стали ждать решения спора: в 1926 году Г. Шиферштейн получил патент №10467 на повозку с колеблющимся грузом, которая может двигаться по снегу, земле и воде.
В 1934 году М. Колмаков из Челябинска предложил повозку (а.с. №45781), которая двинется, как считает автор, за счет ЦБС. А потому она не нуждается в дороге и в сцеплении с поверхностью пути, напоминая что-то вроде центробежной ракеты.
С. Купцов и К. Карпухин (1961 год, а.с. №151574) придумали плоскую самоходную систему с эксцентриками, создающими центробежные силы. Через десять лет похожие прыгающие механизмы построили М. Чернин и Ю. Подпругин...».
Что же можно сказать сегодня по существу дела? Ссылаясь на теоретическую механику, специалисты-преподаватели отрицают возможность работы безопорных движителей. Однако некоторые модели перемещаются, хотя причины движения теоретики видят в особенностях сцепления тележек с дорогой.»

Позиция В. Околотина и других исследователей, отрицающих безопорное движение несколько странная. Если они видят, в чем инерцоиды противоречат фундаментальным законам природы, то неплохо бы дать детальный теоретический разбор замеченных ими противоречий и поставить на этом точку. Неплохо бы так же привести свои соображения по поводу значительного расхождения количественного расчета поступательного движения инерцоидов с учетом взаимодействия с окружающей средой с практическими результатами действующих моделей. Если В. Околотин выступает только как обозреватель, то можно было привести конкретные детальные мнения ученых, которые занимаются проблемой безопорного движения. Если же серьезных трудов на эту тему нет, то нет и никакого смысла голословно все отрицать. Феномен инерцоидов существует и пока что опровергает доводы всех скептиков на практике.

Напрасно В. Околотин иронизирует, что «…*если подобное удастся* (имеется в виду конструирование инерцоидов)*, содрогнется не только техника, а и вся наука, ибо на сохранении импульса базируются все знания человечества»*. Подобное уже давно удалось. Инерцоиды существуют уже без малого целый век, но мир от этого не содрогнулся и не перевернулся, потому что:

Во-первых: инерцоиды движутся не вопреки законам природы, а в соответствии с законами природы.

Во-вторых: практическое применение устройств типа инерцоидов на наш взгляд ограничено, т.к. их КПД очень низок. Для повышения тяги инерцоидов необходимо либо увеличивать массу грузов и длину рычагов, либо увеличивать скорость вращения. Первый путь неприемлем, а второй трудно осуществим. Управлять скоростью вращения достаточно больших масс да еще дважды за один оборот на больших скоростях вращения очень затруднительно. Из-за большой инерции движения грузов начинать разгон и торможение нужно задолго до наиболее эффективных зон разгона и торможения, что само по себе снижает эффективность инерцоида. Как правило, на больших скоростях инерцоиды начинают работать значительно хуже.

Непонятно одно, почему отвергается то, что реально существует, что можно потрогать руками, увидеть глазами, сделать необходимые замеры и наблюдения. Но зато в современной теоретической физике спокойно существуют и не встречают никаких возражений такие понятия, как:

- «искривление пространства»,
- «кручение пространства»,
- «пространство-время»,
- «вибраторы-струны»,
- «пятые, шестые и энные измерения»
- и т. д. и т. п.

Ни один физик на Земле и даже авторы этих понятий не смогут доходчиво объяснить непосвященному человеку, что это такое, потому что эти понятия философские, а не физические. Их «понимают» только те, кто с ними заодно, то есть одной «веры». Но это уже не наука. На наш взгляд физику нужно разделить на две части. В первой части подробно, доходчиво и человеческим языком излагать суть всех явлений. И только после исчерпывающих объяснений переходить к количественным соотношениям, чтобы теорию не подменять количественным описанием. Если суть явлений объяснить не удается, то найденные эмпирическим путем количественные закономерности помещать во вторую часть физики с честным пояснением, что природа вещей еще не установлена, но есть такие-то и такие-то гипотезы. Гипотез должно быть несколько – две три наиболее признанные.

Понятно, что на физику накладываются конъюктурные соображения: желание получить признание, ученую степень и т. д. Но, сколько же можно «искривлять и закручивать пространство», а заодно и мозги себе и всему остальному обществу? Почему нельзя непонятное назвать непонятным, а если что-то непонятно всем, кроме автора, подробнейшим образом разъяснить свою точку зрения, а не прикрываться математическими формулами, которые зачастую к физике не имеют никакого отношения.

Июнь 2006
Астахов А. А.