Силы инерции в общем курсе физики

В.И.Николаев
МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет

Обсуждается вопрос о классификации сил инерции. Сравниваются различные подходы к этому вопросу в известных курсах механики. Обращается внимание на целесообразность указания классификационных признаков, на основе которых проводилось бы разделение сил инерции на их разновидности. Классификация сил инерции может быть достаточно полной, если она учитывает все возможные вклады в суммарное («абсолютное») ускорение материальной точки в инерциальной системе отсчета.

1. Введение

Едва ли стоит доказывать, что тема «Силы инерции» – одна из самых трудных в разделе «Механика» общего курса физики. Чтобы убедиться в этом, достаточно вспомнить один лишь тот факт, что силы инерции, при первом серьезном знакомстве с ними, воспринимаются как весьма непривычные по сравнению с так называемыми «обычными» силами – такими как силы тяготения, упругости, трения. Как помочь студенту-первокурснику в освоении этой темы?

В этом стремлении помочь многое зависит от двух немаловажных обстоятельств: от способа изложения материала и от подбора примеров и задач, поясняющих основные идеи. Под способом изложения здесь подразумевается прежде всего логическая последовательность утверждений, которая имеет своей целью обоснование концепции сил инерции в целом. Логическая стройность изложения материала достигается в том случае, когда вводимые новые понятия приводятся в систему на основе удобных классификационных признаков. В данном случае это относится в первую очередь к самим силам инерции, а точнее – к их разновидностям. Что же касается примеров и задач, их отбор должен быть подчинен фактически той же главной цели: они должны помочь выявить все основные особенности сил инерции, причем непременно в сравнении с «обычными» силами.

Тема «Силы инерции» излагается довольно подробно во многих известных курсах механики (см., например, [1–6]). Вместе с тем практически ни в одном из известных руководств по этому разделу общего курса физики нет ясного ответа на вопрос: сколько всего имеется разновидностей сил инерции? Исключение составляет, пожалуй, лишь книга Д.В.Сивухина [5], где вопрос о разновидностях сил инерции рассматривается на системной основе.

В данной статье предлагается несколько иной, нежели в [5], способ введения сил инерции. Вносимое изменение имеет своей целью сделать формально одинаковой процедуру введения всех без исключения разновидностей сил инерции.[1])

2. Сложение двух движений

Силы инерции удобно ввести в рассмотрение, воспользовавшись «готовыми» формулами кинематики. Следуя сложившейся традиции, обратимся вначале к конкретному случаю, когда материальная точка участвует сразу в двух движениях. Во-первых, она движется относительно некоторой системы отсчета К', имея в этой системе радиус-вектор **r'**, скорость **v'** и ускорение **a'**, соответствующие каждому данному моменту времени t («относительное» движение). Кроме того, эта точка участвует еще и во втором движении – вместе с системой К', которая «переносит» ее относительно системы отсчета К («переносное» движение).

Задача о сложении двух движений точки, «относительного» и «переносного», состоит в том, чтобы «пересчитать» кинематические характеристики ее движения в К'-системе **r'**, **v'**, **a'** в аналогичные характеристики ее движения в К-системе **r**, **v**, **a**. В итоговые формулы, наряду с названными шестью векторными величинами, должны войти, очевидно, и «параметры задачи» – кинематические характеристики самого «переносного» движения.

Помня о главном предмете разговора (он вынесен в заголовок статьи), условимся рассматривать достаточно общий случай «переносного» движения: это позволит нам не упустить из виду ни одной из разновидностей сил инерции. Будем считать, что начало отсчета O' системы К' задается в К-системе радиус-вектором **R** и что оно имеет (в той же К-системе) скорость **V** (= d**R**/dt) и ускорение **A** (= d**V**/dt). Сама К'-система, как «целое», пусть при этом еще и вращается (рис. 1) – вокруг мгновенной оси, проходящей через ее начало отсчета O', с угловой скоростью **ω** и угловым ускорением **β** (= d**ω**/dt). В роли «параметров задачи» выступают, таким образом, четыре векторных величины: **R**, **V**, **ω**, **β**.

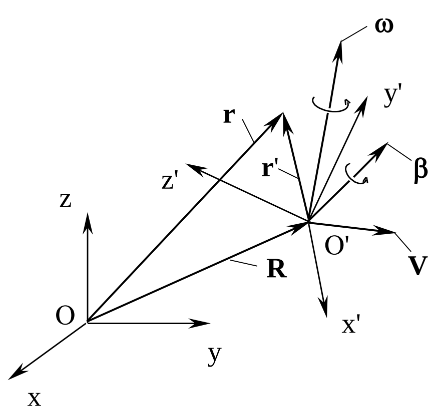

Рис. 1.

Результатом решения задачи о сложении двух движений точки будут, как известно, следующие итоговые формулы (подробности см. в [5, 2]):

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{r}', \tag{1}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{V} + [\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}'] + \mathbf{v}', \tag{2}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{A} + \left[\boldsymbol{\omega}\left[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}'\right]\right] + \left[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}'\right] + 2\left[\boldsymbol{\omega}\mathbf{v}'\right] + \mathbf{a}'. \tag{3}$$

---

[1]) Выбранные здесь терминология и обозначения соответствуют в основном [5], а также [2].

3. Об ускорениях точки

Основной интерес для нас представляет сейчас, естественно, формула (3): она позволяет «пересчитать» ускорение точки из К'-системы в К-систему, а значит, и наоборот – из К-системы в К'-систему. Благодаря этому обстоятельству, уравнение движения точки, записанное в К-системе (оно будет содержать ее «абсолютное» ускорение **a**), можно будет «приспособить» для записи (и интерпретации) в К'-системе. Но об этом далее. Сейчас же, чтобы выявить удобные классификационные признаки, по которым можно различать разновидности сил инерции, выделим вклады в ускорение **a** в соответствии с тем, что точка участвует в двух движениях – «переносном» и «относительном».

Сумма первых трех вкладов в **a** – это, по определению, «переносное» ускорение точки:

$$\mathbf{a}_{\text{пер}} \equiv \mathbf{A} + \left[\boldsymbol{\omega}\left[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}'\right]\right] + \left[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}'\right]. \tag{4}$$

«Переносное» ускорение $\mathbf{a}_{\text{пер}}$ не содержит никаких индивидуальных характеристик *движения* самой рассматриваемой точки. Ведь, действительно, радиус-вектор **r'**, как и все другие величины в (4) – **A**, $\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\beta}$, не является индивидуальной характеристикой ее *движения*: это всего лишь радиус-вектор занимаемого ею места в К'-системе. Если в этом месте нет никакой материальной точки, то оно, это место, все равно будет «переноситься» К'-системой относительно К-системы с этим ускорением $\mathbf{a}_{\text{пер}}$. Если же в этом месте, задаваемом радиус-вектором **r'**, есть еще и материальная точка, то и она, согласно (3), тоже будет иметь вклад $\mathbf{a}_{\text{пер}}$ в ее суммарное ускорение **a** в К-системе.

Поскольку ускорение $\mathbf{a}_{\text{пер}}$ содержит три различных вклада, то, значит, есть три различных причины его возникновения (здесь пока имеется в виду кинематическая, т.е. описательная, сторона дела). Первая причина – это наличие ускорения $\mathbf{A} \neq 0$ у всех точек К'-системы в ее поступательном движении (со скоростью **V**) относительно К-системы; вторая – вращение К'-системы, как «целого», относительно мгновенной оси, проходящей через ее начало O', с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega} \neq 0$; третья – наличие углового ускорения $\boldsymbol{\beta} \neq 0$ у этого вращательного движения. К-наблюдатель *«увидит»* все эти три вклада в ускорение $\mathbf{a}_{\text{пер}}$: он *может измерить их с помощью линейки и часов*. Что же касается К'-наблюдателя, он «*не увидит*» ни одного из этих трех вкладов в $\mathbf{a}_{\text{пер}}$: ведь все точки К'-системы покоятся относительно К'-системы.

«*Не увидит*» К'-наблюдатель и второго основного вклада в суммарное ускорение точки **a** – так называемое кориолисово ускорение

$$\mathbf{a}_{\text{кор}} \equiv 2\left[\boldsymbol{\omega}\mathbf{v}'\right]. \tag{5}$$

Причина проста: К'-наблюдатель может «увидеть» в своей системе отсчета лишь одно-единственное ускорение из всех перечисленных выше – «относительное» ускорение $\mathbf{a}'$. Это – третий (и последний из основных) вклад в «абсолютное» ускорение точки в К-системе, так что, согласно (3)–(5),

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_{\text{пер}} + \mathbf{a}_{\text{кор}} + \mathbf{a}'. \qquad (6)$$

4. Два уравнения движения точки

Теперь наша задача – записать уравнение движения для некоторой материальной точки массы m. Поскольку мы только еще собираемся ввести в рассмотрение силы инерции, у нас нет иного способа записать уравнение движения точки, кроме традиционного – в инерциальной системе отсчета, где действуют только «обычные» силы. Таким образом, переходя от кинематики движения точки к динамическим аспектам ее движения, мы должны вначале выбрать инерциальную систему отсчета. Допустим, именно такой, инерциальной, является К-система. К'-система будет в таком случае неинерциальной – для этого достаточно, чтобы было выполнено любое из трех условий: $\mathbf{A} \neq 0$, $\boldsymbol{\omega} \neq 0$, $\boldsymbol{\beta} \neq 0$.

В соответствии со вторым законом Ньютона, уравнение движения точки в К-системе представится в виде:

$$\mathbf{F} = \mathrm{m}\mathbf{a}. \qquad (7)$$

Здесь $\mathbf{F}$ – равнодействующая всех «обычных» сил, действующих на материальную точку массы m.

Вот теперь у нас есть возможность «приспособить» уравнение движения, записанное в инерциальной системе отсчета, для записи его в неинерциальной системе. С этой целью перепишем уравнение движения (7), воспользовавшись формулой сложения ускорений (6):

$$\mathbf{F} = \mathrm{m}\,\mathbf{a}_{\text{пер}} + \mathrm{m}\,\mathbf{a}_{\text{кор}} + \mathrm{m}\,\mathbf{a}'. \qquad (8)$$

Если «конструировать» уравнение движения материальной точки в К'-системе по аналогии с (7) на основе эквивалентного ему равенства (8), надо оставить в правой части этого нового уравнения движения только лишь слагаемое $\mathrm{m}\,\mathbf{a}'$:

$$\mathbf{F} + \mathrm{m}(-\mathbf{a}_{\text{пер}}) + \mathrm{m}(-\mathbf{a}_{\text{кор}}) = \mathrm{m}\,\mathbf{a}'. \qquad (9)$$

Так как $\mathbf{F}$ – равнодействующая всех «обычных» сил, то, следовательно, два других слагаемых в левой части уравнения (9) – «необычные» силы? Да, это и есть силы инерции: так можно трактовать эти два новых слагаемых, появившихся в уравнении движения при переходе из инерциальной системы отсчета К в неинерциальную К'-систему.

5. Выбор классификационного признака

Выберем именно такую трактовку уравнения (9): будем считать, что это – уравнение движения материальной точки в К'-системе, причем второе и третье слагаемые в левой его части – это силы инерции, действующие на материальную точку в К'-системе.

Судя по виду названных двух слагаемых в (9), легко решается вопрос о выборе классификационного признака, на основе которого вводятся (а значит, и различаются) разновидности сил инерции. Такой признак можно выбрать, определив следующим образом общую особенность сил инерции:

каждая из разновидностей сил инерции соответствует одному из тех вкладов в «абсолютное» ускорение точки (6) *в инерциальной системе отсчета К, которые «не увидит» К'-наблюдатель в своей неинерциальной системе К'.*

6. Главные разновидности сил инерции

Сами собой напрашиваются и названия двух главных разновидностей сил инерции: «*переносная сила инерции*» и «*кориолисова сила инерции*». Других вариантов, собственно, и нет, поскольку термин «кориолисова сила инерции» используется авторами известных руководств по курсу механики, а термин «переносная сила инерции» – совершенно ему аналогичен (хотя и не является общепризнанным).

Эти названия можно теперь закрепить и в формальных определениях двух главных разновидностей сил инерции – в соответствии с тем, как они представлены в уравнении движения (9):

переносной силой инерции, действующей на материальную точку массы m *в неинерциальной системе отсчета, называется сила, равная произведению массы этой материальной точки на взятое с обратным знаком ее переносное ускорение:*

$$\mathbf{F}_{\text{пер}} \equiv \mathrm{m}(-\mathbf{a}_{\text{пер}})\,; \tag{10}$$

кориолисовой силой инерции, действующей на материальную точку массы m *в неинерциальной системе отсчета, называется сила, равная произведению массы этой материальной точки на взятое с обратным знаком ее кориолисово ускорение:*

$$\mathbf{F}_{\text{кор}} \equiv \mathrm{m}(-\mathbf{a}_{\text{кор}})\,. \tag{11}$$

Важно заметить, что знак «минус» в формулах (10) и (11) помещен в круглые скобки – туда, где вектор ускорения.[2]) Это сделано в качестве «профилактической меры»: уже из самих этих формул видно, что вводимые с их помощью силы инерции направлены *против* направления векторов тех ускорений, с которыми они связаны. Другими словами, формула (10) может служить напоминанием о том, что переносное ускорение $\mathbf{a}_{\text{пер}}$ вызывается *не* переносной силой инерции $\mathbf{F}_{\text{пер}}$. Аналогично, кориолисово ускорение $\mathbf{a}_{\text{кор}}$ вызывается *не* кориолисовой силой инерции $\mathbf{F}_{\text{кор}}$, как это непосредственно видно из формулы (11).

Между тем этот важный методический аспект темы «Силы инерции» вообще никак не комментируется в названных руководствах [1–6] по курсу механики. А ведь, согласитесь, велик соблазн считать, что переносное ускорение вызывается переносной силой инерции, а кориолисово ускорение – кориолисовой силой инерции!

7. Разновидности переносной силы инерции

В отличие от кориолисовой силы, переносная сила инерции сама состоит из вкладов, не зависящих друг от друга. Этих вкладов, согласно (4) и (10), три:

$$\mathbf{F}_{\text{пер}} = \mathrm{m}(-\mathbf{A}) + \mathrm{m}(-[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']]) + \mathrm{m}(-[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}']). \tag{12}$$

Иначе говоря, переносная сила инерции, в свою очередь, является суммой трех других сил инерции.

Как назвать эти вклады? Вопрос непростой. Если следовать той логике, которая была использована выше при введении переносной и кориолисовой сил инерции, нам нужно начать с названий трех вкладов в переносное ускорение (4). Сейчас мы убедимся, что эта логика годится в данном случае лишь с существенными оговорками.

Все дело в том, что, во-первых, только лишь один вклад в переносное ускорение (4) именуется в учебной литературе (в том числе в [1–6]) вполне определенным образом. Этот вклад – так называемое центростремительное ускорение $[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']]$. Вектор этого ускорения направлен, как известно, к центру круговой орбиты (радиуса $|\mathbf{r}'| \sin \varphi$, где φ - угол между векторами $\boldsymbol{\omega}$ и $\mathbf{r}'$), на которой находится в данный момент времени t материальная точка (рис. 2). Казалось бы,

---

[2]) В книгах [1–6] в формулах, посредством которых вводятся силы инерции, знак «минус» ставится перед массой m, а не перед ускорением $\mathbf{a}_{\text{пер}}$ или $\mathbf{a}_{\text{кор}}$.

силу инерции $m(-[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']])$ следует в таком случае именовать «центростремительной силой инерции». Этот вклад в переносную силу инерции называют, однако, «*центробежной силой инерции*», в чем согласны между собой и авторы книг [1–6]. По-видимому, это продиктовано заботой о людях, изучающих механику. В самом деле: довольно легко можно запомнить, что *центростремительное* ускорение $[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']]$ «*стремится к центру*», а *центробежная* сила инерции $m(-[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']])$ «*бежит от центра*» (рис. 3). На фоне этих мнемонических удобств, тем не менее, разрушается стереотип: названия сил инерции, как видим, могут и не соответствовать тому «рецепту», по которому давались названия двух главных разновидностей сил инерции – переносной и кориолисовой.

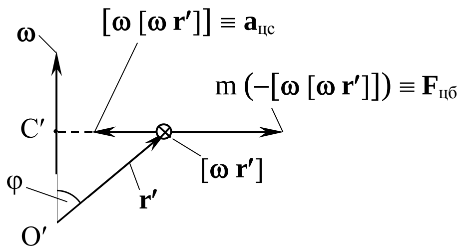

Рис. 2.

Во-вторых, два других вклада в $\mathbf{F}_{\text{пер}}$, первый и третий в (12), остаются, как правило, без названия. В отсутствие названий этих вкладов формируется и соответствующее отношение к ним. Ведь повседневная практика учит: то, что встречается в жизни и представляется важным для нас, имеет свое наименование. Как же все-таки назвать эти два вклада в $\mathbf{F}_{\text{пер}}$ – первый и третий?

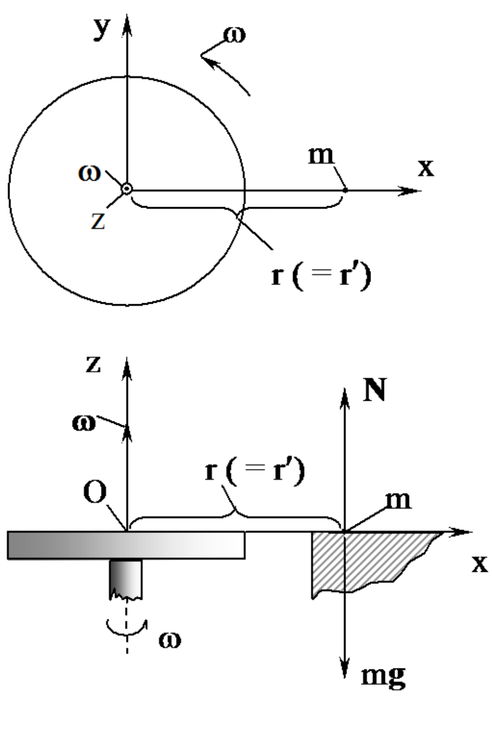

Рис. 3.

Следуя [5], первый из них, $m(-\mathbf{A})$, можно назвать «*поступательной силой инерции*». Эта сила обусловлена ускорением **A** К'-системы как «целого» относительно инерциальной К-системы в ее (К'-системы) поступательном движении. Заметим попутно, что все другие авторы из списка книг [1–6] оставляют эту силу инерции вообще без названия, чем и формируют отношение к ней как к не заслуживающей внимания «поправке» к другим силам инерции.

Хуже всего обстоит дело с последним, третьим, вкладом в переносную силу инерции – силой $m(-[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}'])$. Ее-то как назвать? Трудность в поиске названия связана с тем, что ускорение $[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}']$ своего специфического названия не имеет. Если искать выход из этой ситуации, то можно обратить внимание на то, что есть две разновидности механического движения – поступательное и вращательное. Среди ускорений различного вида первому из этих двух движений, поступательному, соответствует (по названию и конкретному «воплощению») поступательное ускорение **A**, а второму, вращательному, – … какое? Пока никакое: нет такого термина – «вращательное ускорение»! Почему бы не ввести его? Хотя бы потому, что осталась без своего названия одна-единственная сила инерции – вклад в переносную силу инерции $\mathbf{F}_{\text{пер}}$, равный $m(-[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}'])$. Вот и назовем так это ускорение: «вращательное ускорение». Ведь оно действительно связано с вращательным движением, точнее – с вращательным ускорением $\boldsymbol{\beta}$**.** Тогда и силу инерции $m(-[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}'])$ естественно называть «*вращательной силой инерции*».

8. Сколько всего разновидностей сил инерции?

Дадим ответ и на этот поставленный вопрос: сосчитаем, сколько всего разновидностей сил инерции. При этом будем использовать названия всех обсуждавшихся выше сил инерции.

Главных разновидностей две: *переносная сила инерции* (10) и *кориолисова сила инерции* (11). Если считать все разновидности подряд, то к этим двум должны быть добавлены три других, которые нам встретились выше, – это *поступательная сила инерции*

$$\mathbf{F}_{\text{пост}} \equiv m(-\mathbf{A}), \tag{13}$$

центробежная сила инерции

$$\mathbf{F}_{\text{цб}} \equiv m(-[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']]) \tag{14}$$

и *вращательная сила инерции*

$$\mathbf{F}_{\text{вр}} \equiv m(-[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}']). \tag{15}$$

Получается, таким образом, что всего разновидностей сил инерции пять. Как это было видно из комментариев по поводу «происхождения» разновидностей сил инерции, на поставленный вопрос можно ответить и по-другому: главных разновидностей две, из которых одна имеет, в свою очередь, три независимых друг от друга вклада. Вот еще один вариант ответа, эквивалентный предыдущим двум: разновидностей сил инерции две ($\mathbf{F}_{\text{пер}}$ и $\mathbf{F}_{\text{кор}}$), для одной из которых ($\mathbf{F}_{\text{пер}}$) можно выделить три частных случая ($\mathbf{F}_{\text{пост}}$, $\mathbf{F}_{\text{цб}}$ и $\mathbf{F}_{\text{вр}}$).

Обратим еще внимание на то, что, по аналогии с формулами (10) и (11) для сил инерции $\mathbf{F}_{\text{пер}}$ и $\mathbf{F}_{\text{кор}}$, в формулах (13)–(15) для сил инерции $\mathbf{F}_{\text{пост}}$, $\mathbf{F}_{\text{цб}}$ и $\mathbf{F}_{\text{вр}}$ знак «минус» помещен в круглые скобки – соответственно перед поступательным, центростремительным и вращательным ускорениями. Как и в случае формул (10) и (11), это сделано во имя все той же «профилактической цели»: благодаря этому малозаметному обстоятельству, формулы для трех различных вкладов в переносную силу инерции, (13)–(15), служат ненавязчивым напоминанием о том, что каждый из этих трех вкладов в $\mathbf{F}_{\text{пер}}$ антипараллелен вектору ускорения, которым он обусловлен. Иначе говоря, из этих формул видно, что поступательное ускорение $\mathbf{A}$ вызывается *не* поступательной силой инерции $\mathbf{F}_{\text{пост}}$, центростремительное ускорение $\left[\boldsymbol{\omega}\left[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}'\right]\right]$ – *не* центробежной силой инерции $\mathbf{F}_{\text{цб}}$, вращательное ускорение $\left[\boldsymbol{\beta}\mathbf{r}'\right]$ – *не* вращательной силой инерции $\mathbf{F}_{\text{вр}}$.

9. Об особенностях сил инерции

Теперь вновь вернемся к вопросу о «необычности» сил инерции. У сил инерции есть особенности, отличающие их от так называемых «обычных» сил. В частности, к ним неприменим третий закон Ньютона, поскольку силы инерции – не силы взаимодействия, а значит, нельзя указать тело, со стороны которого они действуют.

При внимательном рассмотрении особенностей сил инерции нетрудно, однако, обнаружить, что в своих рассуждениях мы фактически относимся к ним, как к «обычным» силам. Так, обсуждая вопрос о применимости к ним третьего закона Ньютона, мы вынуждены вспомнить, как вводятся силы инерции. Ни о каком нарушении третьего закона Ньютона не может быть и речи. Ведь если каждая из разновидностей сил инерции обусловлена тем вкладом в «абсолютное» ускорение **a**, который «не увидит» К'-наблюдатель в своей неинерциальной системе К', то уже на этом начальном этапе возникновения сил инерции, как понятий динамики движения точки, фактически формируется утверждение о бессмысленности применения к ним третьего закона Ньютона: да, силы инерции – тоже силы, только это не силы взаимодействия, а значит, вопрос о применении к ним третьего закона Ньютона отпадает сам собой.[3])

Приведенный пример иллюстрирует, таким образом, важную истину: к силам инерции следует относиться как к «обычным» силам – правда, при том очевидном условии, что они требуют корректного к себе отношения, т.е. полного соответствия действий над ними законам ньютоновой механики.

Рассмотрим в этой связи еще один пример «необычного» проявления сил инерции. Вместе с тем это будет пример такого же отношения к ним, как и к «обычным» силам.

10. Силы инерции в роли центростремительной силы

Представим себе сценку, знакомую всем с детства: один человек (К) стоит на земле и смотрит, как другой (К') катается на карусели. Спросим себя: какие силы действуют на «наблюдателя К» с точки зрения каждого из двух «наблюдателей» – К и К'?

Упростим ситуацию с таким расчетом, чтобы она в полной мере соответствовала обсуждавшимся выше формулам для сил инерциии (и выбранным обозначениям). Будем считать, что «наблюдатель К» – это материальная точка массы m, покоящаяся в системе отсчета, связанной с землей, а сама эта система является инерциальной (К-система). Пусть при этом «наблюдатель К'» покоится в системе отсчета, связанной с каруселью (К'-система), а карусель вращается вокруг вертикальной оси z системы К с *постоянной* угловой скоростью $\boldsymbol{\omega}$ (рис. 4). Выберем начала отсчета для обеих систем координат, O и O', совпадающими, причем в той же горизонтальной плоскости (xy и x'y'), где находится точка массы m.

Рассмотрим картину сил, например, в тот момент времени, когда ось x' совпадает с осью x. В К-системе на точку массы m действуют только «обычные» силы. Этих сил две: сила тяжести m$\mathbf{g}$ и реакция опоры $\mathbf{N}$ (всеми прочими «обычными» силами можно пренебречь ввиду их очевидной малости). Поскольку в К-системе точка массы m покоится (а значит, $\mathbf{a} = 0$), равнодействующая «обычных» сил равна нулю:

$$m\mathbf{g} + \mathbf{N} = 0. \qquad (16)$$

При переходе из К-системы в К'-систему возникнут два новых принципиально важных обстоятельства: к «обычным» силам добавятся силы инерции, а у точки массы m возникнет ускорение: $\mathbf{a}' \neq 0$. Ввиду условия (16) это ускорение не может быть вызвано «обычными» силами. Значит, оно вызывается силами инерции. В К'-системе точка массы m движется по окружности (некоторого радиуса r') с постоянной по величине скоростью

[3]) Оставаясь в рамках ньютоновой механики, здесь мы даже не затрагиваем вопроса об эквивалентности сил инерции и сил тяготения.

$$\mathbf{v}' = -\,[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}'], \tag{17}$$

а потому $\mathbf{a}'$ - это *центростремительное* ускорение:

$$\mathbf{a}' = \mathbf{a}_{\text{цс}} \equiv \omega^2(-\mathbf{r}'). \tag{18}$$

Так мы приходим к выводу о том, что в рассматриваемом примере в роли *центростремительной* силы выступает равнодействующая сил инерции!

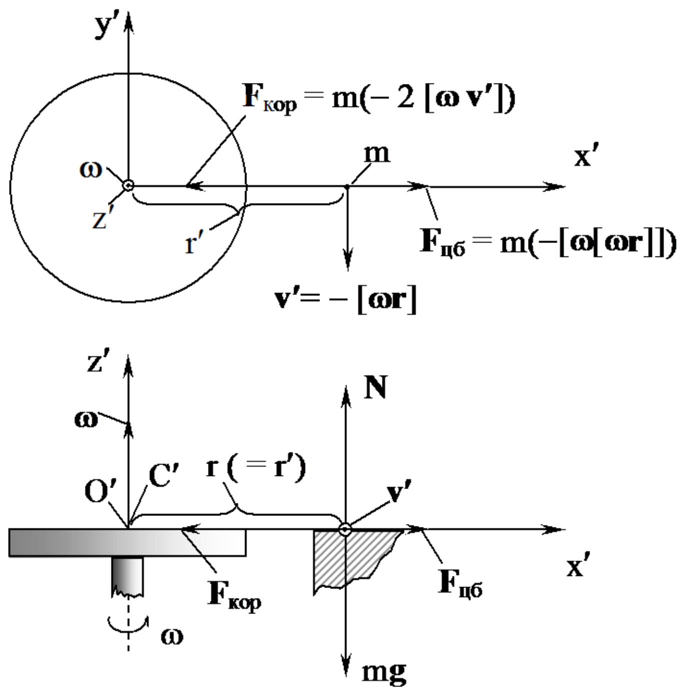

Рис. 4.

Выясним, из каких конкретных вкладов состоит равнодействующая сил инерции. Переносная сила инерции $\mathbf{F}_{\text{пер}}$ содержит в данном случае лишь один из трех возможных вкладов: согласно (12), это центробежная сила инерции $\mathbf{F}_{\text{цб}} \equiv m(-[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']])$. Действительно, начало отсчета O' покоится в K-системе, а значит, $\mathbf{A}$ = 0. Кроме того, $\boldsymbol{\omega}$ = const, так что и $\boldsymbol{\beta}$ = 0. Таким образом, первый и третий вклады в силу инерции $\mathbf{F}_{\text{пер}}$ оказываются, согласно (12), равными нулю.

Центробежная сила инерции не может, однако, выступать «в одиночку» в роли центростремительной силы, поскольку она направлена в сторону *от центра* O' круговой траектории точки массы m. Единственная сила, оставшаяся пока без комментариев, это кориолисова сила инерции $\mathbf{F}_{кор} \equiv m(-2[\boldsymbol{\omega}\mathbf{v}'])$. Она-то и должна, очевидно, компенсировать «с запасом» силу $\mathbf{F}_{цб}$, формируя вместе с нею центростремительную силу $\mathbf{F}_{цс}$. Иначе говоря, сила $\mathbf{F}_{кор}$ должна быть направлена *к центру* O' круговой орбиты, а по величине своей она должна быть больше, чем сила $\mathbf{F}_{цб}$. При помощи рис. 4 нетрудно убедиться, что так оно и есть.

С учетом сказанного выше уравнение движения точки массы m в К'-системе можно записать в следующем виде:

$$\underbrace{m\mathbf{g} + \mathbf{N}}_{=0} + \underbrace{m\left(-[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\,\mathbf{r}']]\right) + m\left(-2\left[\boldsymbol{\omega}\left(-[\boldsymbol{\omega}\,\mathbf{r}']\right)\right]\right)}_{\mathbf{F}_{цс}} = m\underbrace{\omega^2(-\mathbf{r}')}_{\mathbf{a}_{цс}}. \quad (19)$$

По своей «конструкции» это равенство совершенно аналогично уравнению движения (9). В левой его части третье и четвертое слагаемые – это, соответственно, центробежная и кориолисова силы инерции. Легко видеть, что поскольку $[\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}']] = -\mathbf{r}'\omega^2$, равнодействующая сил инерции, выступая в роли центростремительной силы, действительно обеспечивает наличие у точки массы m центростремительного ускорения $\omega^2(-\mathbf{r}')$ при ее движении по окружности – в полном соответствии с исходным «прообразом» (9) для уравнения движения материальной точки в неинерциальной системе координат.

11. Заключение

Изложенная выше концепция сил инерции содержит в качестве своей основы идею выбора классификационных признаков, с помощью которых вводятся разновидности этих сил. Как мы видели, «рецепт», по которому вводится каждая из конкретных разновидностей сил инерции, связан всякий раз с тем конкретным вкладом в абсолютное ускорение материальной точки **a** в инерциальной системе отсчета К, который *не увидит* К'-наблюдатель в своей неинерциальной системе К'. Таким образом, данная классификация сил инерции – это, по существу, классификация тех вкладов в ускорение **a**, которые *не увидит* К'-наблюдатель. При таком подходе к классификации сил инерции довольно отчетливо прослеживается «преемственность» между названиями разновидностей сил инерции в К'-системе и названиями соответствующих им традиционно вводимых вкладов в ускорение материальной точки **a** в К'-системе. Лишь в одном случае такой «преемственности» нет: термин «центробежная сила инерции», не имеющий аналога среди названий вкладов в ускорение **a**, прочно вошел в повседневную практику, и с этим приходится смириться.

Литература

1. *Фриш С.Э., Тиморева А.В*. Курс общей физики, т. 1. М.: ГИТТЛ, 1953, стр. 68-78.
2. *Хайкин С.Э.* Физические основы механики. М.: Физматгиз, 1963, стр. 355-398.
3. *Стрелков С.П*. Механика. М.: Наука, 1965, стр. 141-163.
4. *Киттель Ч., Найт У., Рудерман М.* Берклеевский курс физики. Механика. М.: Наука, 1971, стр. 101-119.
5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики, т. 1, Механика. М.: Наука, 1974, стр. 333-378.
6. *Матвеев А.Н*. Механика и теория относительности. М.: Высшая школа, 1986, стр. 153-170.

Inertial forces in general physics course

V.I. Nikolaev

M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

The problem of classification of inertial forces in the general physics course is discussed. Various approaches to this problem in the famous courses on mechanics are compared. The point of view is developed that it would be reasonable to show definitely the classification criterions for differing inertial forces onto their varieties. The classification of inertial forces may be full enough only in the case if it takes into account all possible contributions to the net (“absolute”) acceleration of a mass point in an inertial reference system.