

УДК 372.853

ШКОЛЬНАЯ ФИЗИКА: ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА**Кычкин И.С., Сивцев В.И.***ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Якутск,
e-mail: kof_fti@mail.ru*

В статье говорится о возможности в объеме школьной физики ознакомить учеников с силами инерции, появляющихся во вращающейся системе отсчета – центробежной силе и силе Кориолиса. Рассматриваются случаи нарушения второго закона Ньютона. Статья будет полезна учителям общеобразовательных школ и преподавателям высших учебных заведений.

Ключевые слова: физика в школе, второй закон Ньютона, центробежная сила, сила Кориолиса, нарушение второго закона Ньютона

SCHOOL PHYSICS: NEWTON'S SECOND LAW**Kychkin I.S., Sivtsev V.I.***North-Eastern Federal University, Yakutsk, e-mail: kof_fti@mail.ru*

The article is devoted to introduction of inertial forces, occurring in rotating reference systems – a centrifugal force and Coriolis force to students within school physics program. Cases of violations of Newton's second law are considered. The article will be useful for school and higher education institutions teachers.

Keywords: physics at school, Newton's second law, centrifugal force, Coriolis force, violation of Newton's second law

Основываясь на опытах Галилея, поставив и свои опыты, Ньютон открыл закон, названный вторым законом Ньютона, который гласит, что ускорение тела прямо пропорционально действующей на него силе и обратно пропорционально его массе, т.е.,

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}. \quad (1)$$

Его записывают еще и в виде

$$m\vec{a} = \vec{F}. \quad (2)$$

Но, как показывает опыт работы с первокурсниками, видимо, учителя школ не очень акцентируют внимание учеников на то, что ускорение $\vec{a}$ всегда направлено параллельно вызывающей его силе $\vec{F}$ [1-3]. На это указывают затруднения первокурсников на простой вопрос «как направлено ускорение, например, в следующих случаях?»

При полете камня в однородном поле тяжести (сопротивлением воздуха пренебречь) в точках 1, 2, 3:

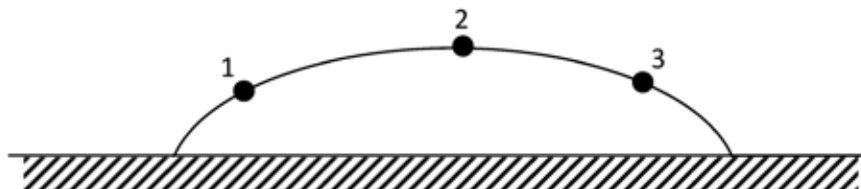


Рис. 1

При движении частицы вдоль произвольной траектории, если сила, действующая на частицу известна (например, в точках 1, 2):

(ИСО) и сила $\vec{F}$ в формуле (2) представляет реальную силу, т.е., силу, действующую на данное тело со стороны других тел или

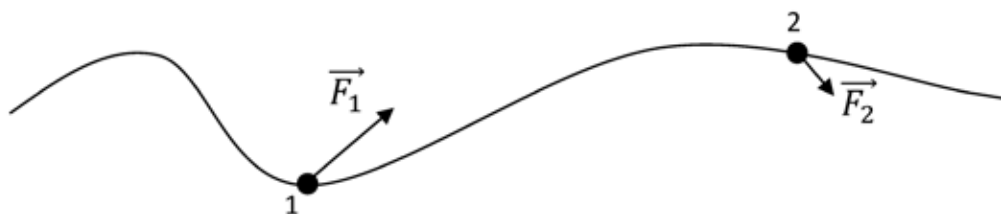


Рис. 2

При движении частицы по окружности, если сила, действующая на частицу, известна (например, в точке 1).

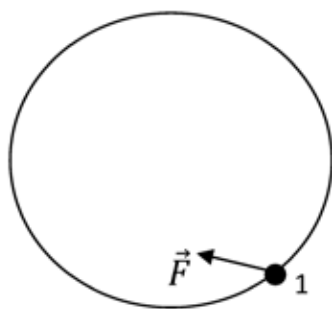


Рис. 3

Ответ прост: ускорение всегда направлено вдоль действующей силы. Например, на первом примере на камень действует единственная сила, сила тяжести $m\vec{g}$, направленная вертикально вниз и ускорение камня в любой точке траектории направлено вертикально вниз и по второму закону Ньютона

$$m\vec{a} = m\vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \vec{g}$$

просто равно ускорению свободного падения. Во втором и третьем примерах ускорения направлены вдоль указанных сил. «Любимыми» ответами большинства первокурсников на первом примере является «ускорение направлено по касательной», а в третьем примере – «ускорение направлено к центру окружности – т.е., является центростремительным». К сожалению, неверные ответы.

Второй закон Ньютона (1) записан относительно инерциальной системы отсчета

полей. В неинерциальных системах отсчета (НИСО) появляются дополнительные силы – силы инерции, т.е., второй закон Ньютона в НИСО принимает вид [4]:

$$m\vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}}, \quad (3)$$

где $\vec{F}_{\text{ин}}$ – появляющаяся только в НИСО сила инерции. НИСО бывают двух видов:

А. Система отсчета, движущаяся поступательно, но с ускорением $\vec{a}_0$ относительно любой ИСО.

В. Вращающаяся система отсчета

А. Первый вид НИСО (например, тормозящий автобус) в школьной физике не сложно рассмотреть (вывод силы инерции в этом случае легко получается из свойства сложения векторов) и сила инерции

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}_0. \quad (4)$$

Об этой силе мы уже говорили.

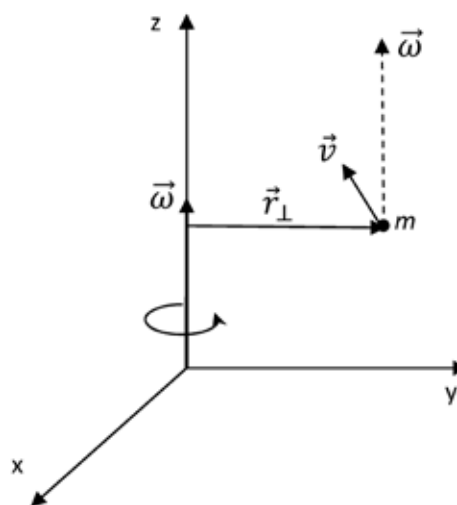


Рис. 4

В. Второй вид НИСО в школе сложно изучать, т.к., для этого надо хорошо знать свойства умножения векторов (скалярное, векторное произведения векторов), основы математического анализа. Но основные выводы можно дать и в школе.

Допустим, что мы находимся в НИСО, вращающейся с постоянной угловой скоростью $\vec{\omega}$ (см. рисунок, где для определенности система координат выбрана так, что вращение происходит вокруг оси z против часовой стрелки, если смотреть сверху). Вектор угловой скорости $\vec{\omega}$ направлен вдоль оси z (направление $\vec{\omega}$ определяется правилом правого буравчика (винта)). Второй закон Ньютона имеет вид (3), где сила инерции $\vec{F}_{ин}$ может быть представлена как векторная сумма двух сил инерции

$$\vec{F}_{ин} = \vec{F}_{ц.б.} + \vec{F}_{кор}, \quad (5)$$

где

$$\vec{F}_{ц.б.} = m\omega^2 \vec{r}_\perp - \quad (6)$$

центробежная сила, а

$$\vec{F}_{кор} = 2m[\vec{v} \times \vec{\omega}] - \quad (7)$$

кориолисова сила. Центробежная сила всегда направлена от оси вращения (вдоль радиуса-вектора $\vec{r}_\perp$ частицы m относительно оси вращения). Кориолисова сила действует только на движущееся тело (если скорость $\vec{v}$ тела равна нулю, то она исчезает) и её направление определяется правилом правого буравчика – на рисунке сила Кориолиса направлена от нас – вращая рукоятку обычного буравчика (винта) от первого перемножаемого вектора $\vec{v}$ ко второму $\vec{\omega}$ (на рисунке $\vec{\omega}$ изображен пунктиром) поступательным перемещением буравчика получаем направление кориолисовой силы. Кориолисова сила перпендикулярна плоскости, на которой в данный момент времени находятся векторы скорости $\vec{v}$ тела и угловой скорости $\vec{\omega}$ вращения НИСО, т.е., направление и величина кориолисовой силы постоянно меняются. Кориолисову силу можно записать в виде формулы для модуля силы, добавив, что направление этой силы определяется правилом правого буравчика, т.е., «ППБ»:

$$F_{кор} = 2m\omega v \sin \alpha, \text{ ППБ.} \quad (8)$$

Определение сил инерции, появляющихся во вращающейся НИСО, т.е., центробежной и кориолисовой сил в виде формул (6) и (8) школьникам можно дать, не забывая при этом показать примерное соотношение

$$F_{тяг} : F_{ц.б.} : F_{кор} \approx 1:10^{-3} : 10^{-5} v \quad (9)$$

сил тяготения, центробежной и кориолисовой сил, если в качестве вращающейся НИСО взять Землю. Это соотношение объясняет, почему Земля может считаться ИСО.

В конце этого вопроса желательно сказать о нарушениях второго закона Ньютона. Мы знаем, что законы Ньютона справедливы для макромира. Сегодня можно сказать, что законы Ньютона в некоторых случаях нарушаются. Остановимся на двух случаях нарушения второго закона Ньютона.

А. Релятивистский случай

Через импульс частицы

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (10)$$

второй закон Ньютона может быть записан в виде

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}, \quad (11)$$

т.е., скорость изменения импульса равна силе, действующей на тело (частицу). Это соотношение называется еще законом изменения импульса (ЗИИ), из которого можно получить закон сохранения импульса (ЗСИ).

В релятивистском случае, т.е., в случае, когда скорость v тела приближается к скорости c света в вакууме, импульс тела определяется аналогично ньютоновскому (10), но с учетом зависимости массы m тела от скорости:

$$\vec{p} = m\vec{v}, \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (12)$$

где m_0 – масса покоя частицы. Подставив (12) в (11) получаем:

$$\vec{F} = m\vec{a} + \Delta m \vec{a}_\tau, \quad (13)$$

где

$$\Delta m = \frac{m}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cdot \frac{v^2}{c^2}. \quad (14)$$

В формуле (13)

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (15)$$

– ускорение частицы,

$$\vec{a}_\tau = a_\tau \vec{\tau}, \quad a_\tau = \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

– тангенциальное ускорение частицы. Формула (13) показывает, что в релятивистском случае второй закон Ньютона нарушается и ускорение $\vec{a}$ тела уже не направлено

вдоль действующей силы $\vec{F}$ (они не параллельны). Об этом в школьной физике тоже можно было бы говорить.

В. Мегамир

Окружающий нас мир можно условно разделить на три уровня: микромир, макромир, мегамир. Мегамир – это солнечная система, звездные комплексы, галактики – всё то, что невообразимо больше типичных размеров объектов макромира. В настоящее время известно, что Вселенная расширяется с ускорением и это невозможно объяснить вторым законом Ньютона и законом всемирного тяготения. Современная астрофизика считает, что это явление можно объяснить лишь наличием темной материи, на которую приходится около 95% всей материи Вселенной, но которая пока не наблюдаема и темную энергию, которая представляет энергию вакуума. За описание роли темной энергии в процессе ускорения Вселенной американский и австралийский физики Сол Перлмуттер, Адам Райес, Брайан Шмидт в 2011 году стали лауреатами Нобелевской премии по физике. Но есть и альтернативный подход в попытке объяснить

нарушение второго закона Ньютона в мегамире – попытка построить модифицированный второй закон Ньютона, но этот подход пока не имеет ощутимой поддержки – ни экспериментально, ни теоретически.

Заключение

В статье постарались обратить внимание преподавателей физики (в школах, вузах) на некоторые моменты во втором законе Ньютона, на которые в школьных учебниках по физике (и не только в школьных) не уделяется достаточного внимания, хотя преподаватели (учителя) должны все это «держать в уме» в процессе преподавания физики или даже постараться объяснить (в школах с углубленным изучением физики).

Список литературы

1. Пурешева Н.С., Вадеевская Н.Е., Исаев Д.А., Физика 10 класс. – М.: Дрофа, 2013. – 272 с.
2. Перышкин А.В., Гутник Е.М., Физика 9. – М.: Дрофа, 2014. – 320 с.
3. Мякишев Г.Я., Буховцев Б.Б., Сотский Н.Н., Физика 10. – М.: Просвещение, 2014. – 416 с.
4. Кычкин И.С., Механика: Учеб. пособие для вузов. – Якутск: Изд. ЯГУ, 2003. – 357 с.