В начале было слово, или Что делать, когда задача не решается

М.БОНДАРОВ

Когда в школьные годы мне не удавалось решить задачу, иногда я шел за помощью к своим родителям. Независимо от условия задачи, их советы не отличались разнообразием. Мама каждый раз говорила: «Сходи и покушай!», папа советовал иначе: «Еще раз прочитай условие задачи!» Как это ни удивительно, обе рекомендации почти всегда помогали. Теперь я понимаю, что оба совета сводились к одному: к задаче имеет смысл вернуться еще раз, подкрепившись в прямом и переносном смысле. Повторное прочтение условия частенько позволяет заметить в нем то, что было упущено сначала.

В этой статье мы коснемся лишь некоторых способов работы с условием задачи, попытаемся научить находить в нем скрытые от неискушенного читателя подсказки, которые автор задачи посылает тем, кто собирается ее решать. «Sapienti sat», – сказали бы в таком случае в Древнем Риме. Мы же выразим ту же мысль по-русски: «Умный поймет с полуслова».

Ну что ж, вступление закончено, давайте перейдем к конкретным примерам.

Перевод единиц измерения

Начнем с мелочи, на которую, конечно же, надо обратить внимание. Это согласованность единиц измерения. Нередко школьные учителя советуют своим ученикам уже при записи «дано» сразу переводить единицы измерения в СИ. Совет, несомненно, дельный, но не универсальный. По-видимому, универсальных советов в решении физических задач, не существует. Практически к каждому, даже самому полезному, совету можно найти контрпример, демонстрирующий его бесполезность (а иногда даже вредность). И это замечательно. Представьте, как скучен был бы процесс решения задачи, если бы она решалась строго по алгоритму. Какая уж тут радость от находки пути ее решения?!

Обсудим вопрос о целесообразности перевода единиц измерения, рассмотрев известную школьную задачу.

Задача 1. *При скорости 15 км/ч тормозной путь автомобиля составляет 1,5 м. Каким будет тормозной путь при скорости 90 км/ч, если торможение в обоих случаях происходит с одинаковым ускорением?*

Решение. Сразу бросается в глаза несогласованность единиц измерения пути (м) и скорости (км/ч). Как поступить? Попробуем перейти в СИ: 90 км/ч = = 25 м/с, 15 км/ч = 25/6 м/с. Как видим, появляется несократимая обыкновенная дробь. Если переводить ее в десятичную, получится приближенное значение, что, естественно, неудобно. Постойте, а нужно ли вообще осуществлять перевод единиц в СИ в данной задаче?

Начнем решать задачу в общем виде. Для определения искомого тормозного пути s_2 удобно использовать формулу

$$s_2 = \frac{v_2^2 - v_{02}^2}{-2a},$$

где $v_{02} = 90$ км/ч – известная начальная скорость во втором случае, a – модуль ускорения автомобиля (он по условию одинаков в обоих случаях, а знак «минус» «отвечает» за торможение), конечная скорость $v_2 = 0$. О конечной скорости в условии явно не написано, но очевидно, что тормозной путь завершается остановкой в конце движения – вот первый в данной статье пример использования «скрытой» в тексте информации. Если теперь записать аналогичную формулу для тормозного пути s_1 в первом случае:

$$s_1 = \frac{v_1^2 - v_{01}^2}{-2a},$$

где $v_{01} = 15$ км/ч, $v_1 = 0$, то мы легко приходим к ответу в общем виде (например, поделив верхнее уравнение на нижнее):

$$s_2 = s_1\frac{v_{02}^2}{v_{01}^2} = s_1\left(\frac{v_{02}}{v_{01}}\right)^2 = 1{,}5\ \text{м}\left(\frac{90\ \text{км/ч}}{15\ \text{км/ч}}\right)^2 = 54\ \text{м}.$$

Мы видим, что перевод единиц в СИ в данной задаче действительно не понадобился. Таким образом, можно сформулировать *1-е правило работы с текстом задачи*: перевод единиц измерения в СИ нужно осуществлять не всегда, а только по мере необходимости. Отметим также и *2-е правило работы с текстом задачи*: в тексте условия полезно как-то выделить слова, хранящие некий скрытый от непритязательного взгляда смысл. Для удобства по ходу разбора задач начнем заполнять *таблицу* (она помещена в конце статьи), в которую будем заносить слова, таящие важный для решения физический смысл, и его расшифровку. Таким термином в первой задаче был *тормозной путь*.

Начальные условия

Как известно, характер движения тел определяется не только действующими на него силами, но и начальными условиями. Например, тело, брошенное вертикально вниз, будет двигаться прямолинейно и равноускоренно. Если же тело брошено вертикально вверх, то сначала оно будет тормозиться с постоянным по модулю ускорением, двигаясь вертикально вверх, а затем начнет разгоняться с тем же ускорением вниз. Изменив направление начальной скорости так, чтобы она была направлена под углом к горизонту, получим движение по параболе. Как видим, ускорение во всех случаях одинаково (при отсутствии сопротивления воздуха), а характер движения различен.

Попробуем на конкретных примерах показать, как может повлиять учет начальных условий на решение задачи.

Задача 2. *Через какое время от начала движения точка, совершающая колебания по гармоническому закону, сместится от начального положения на половину амплитуды? Период колебаний 6 с.*

Решение. Начинаем работать с условием по 2-му правилу. В первую очередь обращаем внимание на информацию о физических величинах: период $T = 6$ с, смещение $|x - x_0| = \frac{A}{2}$. Что нам дают слова «*колебания по гармоническому закону*»? Так называют колебания, происходящие по закону синуса или косинуса. Что же выбрать: синус или косинус? Вновь обращаемся к условию: нужно найти *время от начала движения*. Точка начинает свое движение в одном из крайних положений. Для определенности, пусть в этот момент ее координата $x_0 = A$. Тогда гармонический закон примет вид: $x = A\cos\omega t$, где циклическая частота $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Теперь соберем все в одно уравнение:

$$|A\cos\omega t - A| = \frac{A}{2},$$

которое приводит к ответу: $t = 1$ с.

Задача 3 (НГУ). *Грузик подвешен в точке D на трех одинаковых пружинах, закрепленных на горизонтальной линии в точках A, B, C, причем расстояние AB равно расстоянию BC и равно длине недеформированной пружины (рис.1). В положении равновесия $\angle ADB = \angle BDC = \alpha = 30°$. Внезапно пружина AD разорвалась. Найдите модуль и направление ускорения грузика сразу после разрыва. Массой пружин пренебречь.*

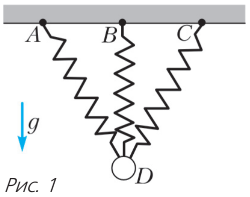

Рис. 1

Решение. Обозначим силы натяжения пружин AD и CD через $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_1'$ соответственно, причем их модули одинаковы и равны F_1, а модуль силы натяжения $\vec{F}_2$ пружины BD равен F_2 (рис.2). До разрыва пружины грузик *неподвижен*, поэтому из условия равновесия по вертикали следует

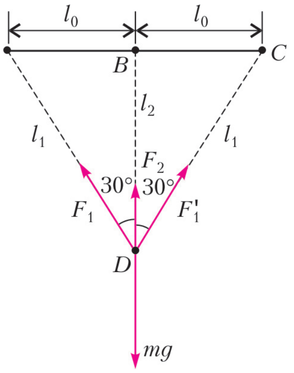

Рис. 2

$$2F_1\cos 30° + F_2 = mg, \text{ или}$$

$$F_1\sqrt{3} + F_2 = mg.$$

По закону Гука имеем

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{k(l_1 - l_0)}{k(l_2 - l_0)}, \text{ или}$$

$$F_2 = \left(\sqrt{3} - 1\right)F_1,$$

поскольку $l_1 = 2l_0$, $l_2 = \sqrt{3}l_0$. Тогда получим

$$F_1 = \frac{mg}{2\sqrt{3} - 1}.$$

Сразу после разрыва пружины AD ее сила упругости обратилась в ноль, зато силы упругости двух других пружин *не могли измениться мгновенно*, поэтому вектор ускорения будет определяться равнодействующей $\vec{R}$ тех же сил $m\vec{g}$, $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1'$, которые существовали до разрыва (кроме исчезнувшей $\vec{F}_1$). Однако мы не будем заниматься достаточно трудоемкой работой нахождения $\vec{R}$, а поступим проще. Вспомним, что до разрыва пружины векторная сумма четырех сил равнялась нулю, т.е. до исчезновения силы $\vec{F}_1$ векторная сумма сил $m\vec{g}$, $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_1'$ компенсировала ее. Другими словами, равнодействующая $\vec{R}$ была равна по модулю силе $\vec{F}_1$ и направлена в противоположную сторону. Туда же и будет направлен вектор ускорения $\vec{a}$ грузика сразу после разрыва пружины. И, наконец, с помощью второго закона Ньютона определяем модуль этого ускорения:

$$a = \frac{F_1}{m} = \frac{g}{2\sqrt{3} - 1} \approx 0{,}4 \text{ м/с}^2.$$

Задача 4 (МИФИ, 1972). *К грузику массой $m_1 = 10$ г, подвешенному с помощью двух нитей, из которых одна горизонтальна, а другая образует с вертикалью угол $\alpha = 60°$, привязан на нити другой грузик массой $m_2 = 20$ г (рис.3). Определите ускорение грузика массой m_2 сразу после пережигания горизонтальной нити. Нити считать нерастяжимыми.*

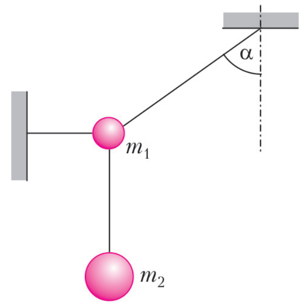

Рис. 3

Решение. В этой задаче наиболее сложным, по-видимому, является выяснение направления векторов ускорений грузиков *сразу после пережигания нити*. Начальный момент времени выбран не случайно – в этот момент ускорения тел определить можно наиболее просто, поскольку известны направления действующих на тела сил.

В момент пережигания горизонтальной нити скорость грузика массой m_1 равна нулю, следовательно, он начнет двигаться по дуге окружности с ускорением $\vec{a}_1$, направленным по касательной к окружности (рис.4). На грузик массой m_2 в начальный момент действуют только направленные по вертикали силы тяжести и натяжения нити, поэтому он приходит в движение с ускорением $\vec{a}_2$, направленным вертикально вниз. Запишем уравнения второго закона Ньютона для каждого грузика в проекциях на направления их ускорений:

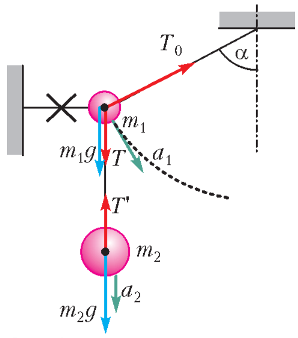

Рис. 4

$$m_1a_1 = (m_1g + T)\sin\alpha,$$

$$m_2a_2 = m_2g - T,$$

где T – модуль силы натяжения нити, соединяющей грузики. Так как нить *нерастяжима*, ускорение нижнего грузика и вертикальная составляющая ускорения верхнего грузика одинаковы:

$$a_2 = a_1\sin\alpha.$$

Отсюда находим

$$a_2 = \left(g \sin^2 \alpha\right) \frac{\frac{m_1}{m_2} + 1}{\frac{m_1}{m_2} + \sin^2 \alpha} \approx 9 \text{ м/с}^2 .$$

Замечание. Обратите внимание на существенное различие в поведении пружин и нитей в первый момент после серьезных изменений в состоянии системы. В то время как пружина в первое мгновение сохраняла свои свойства (ее натяжение мгновенно не менялось), идеальная нить вела себя иначе – она практически мгновенно изменяла силу натяжения, подстраиваясь под новые условия движения.

Условие отрыва

Рассмотрим еще две задачи, в которых тело перестает испытывать действие одной из сил.

Задача 5. *Какую минимальную горизонтальную скорость надо сообщить шарику, чтобы он сделал полный оборот в вертикальной плоскости, если он висит на легкой нерастяжимой нити длиной $l = 2$ м?*

Решение. В этом условии по меньшей мере четыре слова должны заставить задуматься, почему они включены в текст: *легкая нерастяжимая нить и минимальная* скорость. Давайте рассмотрим их по порядку. Нить *легкая*, следовательно, не будем учитывать массу; *нерастяжимая*, значит, когда шарик доберется до верхней точки, он поднимется на высоту $h = 2l$. *Минимальность* начальной скорости подразумевает наименьшую скорость в верхней точке. Мы ничего, вроде бы, не забыли, и пора приступать к математическому оформлению решения.

Будем считать, что в условии подразумевается отсутствие всех видов трения, поэтому выполняется закон сохранения механической энергии:

$$\frac{mv_{0\min}^2}{2} = mgh .$$

Отсюда находим искомую величину минимальной начальной скорости:

$$v_{0\min} = 2\sqrt{gl} .$$

Однако при сверке этого ответа с приводимым в задачнике нас ждет неприятный сюрприз: ответы не сходятся!

Что же нами не учтено? Попробуем разобраться в физике происходящего процесса. Для этого представим, как шарик, двигаясь по окружности, приближается к верхней точке и на мгновение замирает там. Стоп: вот где ошибка! Шарик не может находиться там в покое: нить – это не стержень, способный при сжатии компенсировать действие на шарик силы тяжести. Мало того, при рассчитанной нами минимальной скорости шарик вообще не доберется до верхней точки на высоте $2l$, а пролетит ниже, соскочив с окружности в тот момент, когда сила натяжения нити станет равной нулю. И случится это, заметим, на высоте $h = 5l/3$ (см., например, задачу 4 из упражнений в конце статьи). Выходит, что мы решали совсем другую задачу: о движении шарика, прикрепленного к *невесомому стержню*.

Вернемся, однако, к шарику *на нити*. Мы выяснили, что верхнюю точку шарик должен проходить на скорости так, чтобы сила натяжения нити раньше времени не стала равной нулю. Зато в верхней точке (при *минимальной* начальной скорости) нить перестает быть натянута. Тогда центростремительное ускорение в верхней точке будет создаваться только силой тяжести. Записав для этого момента уравнение второго закона Ньютона в проекциях на вертикальную ось:

$$mg = m\frac{v^2}{l} ,$$

определим величину скорости v (для дальнейшего нам понадобится только ее квадрат) в верхней точке:

$$v^2 = gl .$$

Осталось лишь внести уточнение в первоначальную запись закона сохранения механической энергии:

$$\frac{mv_{0\min}^2}{2} = mg \cdot 2l + \frac{mv^2}{2} .$$

Отсюда находим искомую скорость:

$$v_{0\min} = \sqrt{4gl + v^2} = \sqrt{5gl} = 10 \text{ м/с} .$$

Узелок на память. Подчеркнем еще раз различие случаев, когда шарик прикреплен к *стержню* и когда шарик прикреплен к *нити*.

Задача 6 (ЕГЭ). *Система из грузов массами m и M и связывающей их легкой нерастяжимой нити в начальный момент покоится в вертикальной плоскости, проходящей перпендикулярно оси закрепленной цилиндрической трубы (рис.5). Грузы находятся на горизонтальной прямой, пересекающей ось трубы. В ходе возникшего движения груз массой m отрывается от поверхности трубы в ее верхней точке A. Найдите массу M, если $m = 100$ г. Размеры грузов ничтожно малы по сравнению с радиусом трубы. Трением пренебречь.*

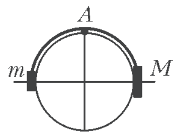

Рис. 5

Решение. Прежде чем приступать к непосредственному решению этой задачи, полезно задуматься над вопросом: каким может быть ответ? В условии из числовых величин задана только масса одного груза, а требуется найти массу другого. Значит, конечное выражение для M должно иметь вид $M = km$, где k – безразмерный коэффициент, который нам и предстоит найти в ходе решения. Другими словами, можно смело вводить нужные для записи уравнений физические величины, поскольку при правильном ходе решения они обязательно сократятся.

Теперь пора подумать о закономерностях, которым подчиняются происходящие в задаче процессы. Можно ли использовать закон сохранения механической энергии? *Трением пренебрегаем*, но ведь есть еще внешние силы, приложенные к грузам: это силы натяжения нити и силы реакции со стороны поверхности трубы. К счастью, силы реакции все время перпендикулярны направлению движения, значит, работы они не совершают. Сила натяжения, приложенная к грузу массой m, направлена вдоль его скорости и, следовательно, совершает положительную работу. А сила натяжения, действующая на груз массой M, направлена против его скорости, т.е. совершает отрицательную работу. Эти работы по модулю одинаковы: *нить нерастяжима* (модули скоростей грузов в

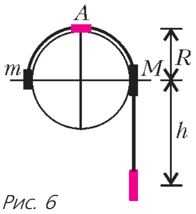

Рис. 6

любой момент времени одинаковы) и *невесома* (модули сил натяжения тоже одинаковы). Кроме того, нерастяжимость нити поможет найти высоту h, на которую опустится груз массой M (рис.6):

$$h = \frac{\pi R}{2},$$

где R – радиус трубы. Вот теперь можно уверенно использовать закон сохранения механической энергии:

$$0 = mgR + \frac{mv^2}{2} - Mg\frac{\pi R}{2} + \frac{Mv^2}{2},$$

где v – скорость каждого груза *в момент отрыва*. В этот момент груз массой m еще движется по окружности, значит, у него есть центростремительное ускорение $a_ц = \frac{v^2}{R}$. Оно вызывается только направленной вниз силой тяжести, поскольку груз уже перестал давить на опору, т.е. силы реакции нет, а сила натяжения нити направлена горизонтально. Запишем уравнение второго закона Ньютона в проекциях на вертикальную ось:

$$mg = m\frac{v^2}{R}.$$

Из двух последних уравнений находим

$$M = m\frac{3}{\pi - 1} \approx 140 \text{ г}.$$

Как видим, наше предположение о том, что все введенные величины обязательно сократятся, подтвердилось.

Экстремальные условия

В задаче 5 мы уже столкнулись с одним из экстремальных условий – с определением *минимальной* скорости. Значительно чаще в задачах бывает нужно найти *максимальные* значения физических величин.

Задача 7 (ЕГЭ). *Начальная скорость снаряда, выпущенного из пушки вертикально вверх, равна $v_0 = 10$ м/с. В точке максимального подъема снаряд разорвался на два осколка, массы которых относятся как 2 : 1. Осколок большей массы первым упал на землю вблизи точки выстрела со скоростью $v_1 = 2v_0$. До какой максимальной высоты H поднялся осколок меньшей массы?*

Решение. В *точке максимального подъема* снаряд на мгновение остановится на высоте h, которую легко найти из закона сохранения механической энергии:

$$\frac{Mv_0^2}{2} = Mgh, \text{ откуда } h = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Здесь мы учли неявно прописанное в условии *пренебрежимо малое сопротивление воздуха*. Применим теперь закон сохранения импульса:

$$0 = mv_{01} - 2mv_{02},$$

где v_{01} и v_{02} – начальные скорости осколков сразу после разрыва снаряда. Теперь ясна связь между начальными скоростями осколков:

$$v_{01} = 2v_{02}.$$

Осколок большей массы *упал на землю первым*, значит, он полетел вертикально вниз. Его скорость v_{02} (вернее, ее квадрат) определим из закона сохранения энергии:

$$2mgh + \frac{2mv_{02}^2}{2} = \frac{2m(2v_0)^2}{2}, \text{ откуда } v_{02}^2 = 4v_0^2 - 2gh = 3v_0^2.$$

Осколок меньшей массы полетит вверх, поднявшись от места разрыва снаряда на высоту

$$\Delta h = \frac{v_{01}^2}{2g} = \frac{4v_{02}^2}{2g} = 6\frac{v_0^2}{g}.$$

Таким образом, *максимальная* высота H подъема осколка меньшей массы равна

$$H = h + \Delta h = \frac{13v_0^2}{2g} = 65 \text{ м}.$$

Замечание. Мы молчаливо предположили, что при разрыве снаряда в верхней точке вполне допустимо применение закона сохранения импульса. Однако здесь есть над чем поразмыслить (подробнее – в решении задачи 12).

Задача 8. *На длинной нити висит тело массой $M = 40$ г, в него попадает пластилиновый шарик массой $m = 10$ г, летящий в горизонтальном направлении со скоростью $v_0 = 2$ м/с. На какую максимальную высоту поднимется система после удара?*

Решение. Эта задача представляется, на первый взгляд, совершенно стандартной. Кажется очевидным, что система достигнет *максимальной высоты* в тот момент, когда тела остановятся. Однако не следует попадать в небольшую ловушку, расставленную автором этой задачи. Нельзя приравнивать начальную кинетическую энергию шарика и потенциальную энергию тел в момент их остановки, поскольку во время прилипания шарика часть механической энергии переходит во внутреннюю. Если это учесть, дальше все будет просто.

Запишем закон сохранения импульса в проекциях на горизонтальную ось:

$$mv_0 = (M + m)v,$$

после чего можно использовать закон сохранения механической энергии:

$$\frac{(M + m)v^2}{2} = (M + m)gh.$$

Решая эту систему уравнений, находим максимальную высоту подъема:

$$h = \frac{m^2v_0^2}{2g(M + m)} = 0{,}8 \text{ см}.$$

Вдумчивый читатель может заметить: а зачем же в условии сказано о том, что нить *длинная*? Оказывается, не случайно. Решая задачу, мы пренебрегали размерами висящего тела и шарика, считая их материальными точками. Насколько правомерно такое предположение? Чтобы ответить на этот вопрос, попробуем оценить размеры тел. Плотность пластилина примем равной $1{,}5$ г/см^3, тогда объем шарика оказывается примерно 7 см^3, а его радиус – порядка 1 см. Из условия не известно, из чего сделано подвешенное на нити тело, однако ясно, что при массе 40 г его размер также порядка 1 см. Таким образом, длина нити действительно должна быть значительно больше этой величины.

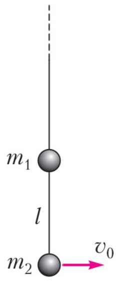

Рис. 7

Задача 9. *На очень длинной нити подвешен шарик массой m_1, к которому на нити длиной l подвешен шарик массой m_2 (рис.7). Какую минимальную начальную скорость v_0 в горизонтальном направлении нужно сообщить нижнему шарику, чтобы соединяющая шарики нить отклонилась до горизонтального положения?*

Решение. И на сей раз в условии не случайно сказано о нити, что она *очень длинная*. Это означает, что при любом движении нижнего шарика скорость верхнего направлена горизонтально, в то время как длинная нить остается вертикальной. Тогда все действующие на систему из двух шариков внешние силы – сила натяжения длинной нити и силы тяжести шариков – оказываются направленными по вертикали и можно использовать закон сохранения импульса в проекциях на горизонтальную ось x:

$$m_2 v_0 = (m_1 + m_2) v_x ,$$

где v_x – проекция скорости второго шарика на эту ось, равная скорости первого шарика. Мы попутно учли *нерастяжимость* соединяющей шарики нити, хотя напрямую об этом в тексте не сказано. При записи закона сохранения механической энергии надо не забыть, что у второго шарика есть еще и вертикальная проекция скорости v_y:

$$\frac{m_2 v_0^2}{2} = \frac{(m_1 + m_2) v_x^2}{2} + \frac{m_2 v_y^2}{2} + m_2 g l .$$

Но *минимальности* начальной скорости соответствует остановка второго шарика по вертикали: $v_y = 0$. Поэтому окончательно получим

$$v_{0\,\min} = \sqrt{2gl\left(1 + \frac{m_2}{m_1}\right)} .$$

Соударения тел

В заключение рассмотрим три задачи на столкновения тел. Хорошо известно, что при абсолютно упругих ударах можно использовать закон сохранения как энергии, так и импульса, а при абсолютно неупругих – только импульса. Однако при внешней простоте подходов к решениям в этих задачах таятся определенные тонкости. Некоторые из них мы и обсудим ниже.

Задача 10 (Всероссийская олимпиада, 1994). *Упругая шайба падает плашмя на горизонтальную абсолютно твердую поверхность таким образом, что в момент падения ее скорость равна $v_0 = 4{,}5$ м/с и направлена под углом $\alpha = 30°$ к горизонту. Коэффициент трения скольжения между шайбой и поверхностью $\mu = 0{,}5$. На каком расстоянии от места падения шайба ударится о поверхность в пятый раз? Влиянием силы тяжести за время удара можно пренебречь.*

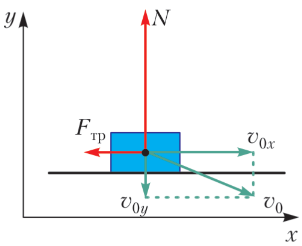

Рис. 8

Решение. В момент падения шайбы на нее действуют две взаимно перпендикулярные силы (влиянием силы тяжести пренебрегаем): направленная вертикально вверх вдоль оси y сила реакции опоры $\vec{N}$ и направленная горизонтально против оси x сила трения $\vec{F}_{тр}$ (рис.8). Импульс силы реакции опоры за время Δt изменяет проекцию импульса шайбы на ось y. Так как шайба *упругая* и поверхность *абсолютно твердая*, то модуль этой проекции после удара сохранится, а ее направление изменится на противоположное:

$$N\Delta t = \Delta p_y = 2mv_{0y} .$$

Изменение проекции импульса шайбы на ось x вызывается импульсом силы трениия:

$$-F_{тр}\Delta t = \Delta p_x = m(v_{1x} - v_{0x}) ,$$

где v_{1x} – проекция скорости шайбы на ось x сразу после первого удара. Учитывая, что $F_{тр} = \mu N$, имеем систему

$$N\Delta t = 2mv_{0y} ,$$

$$\mu N \Delta t = m(v_{0x} - v_{1x}) .$$

Разделив второе уравнение этой системы на первое, получим

$$v_{1x} = v_{0x} - 2\mu v_{0y} = v_0(\cos\alpha - 2\mu\sin\alpha) .$$

Выражение в скобках определяет характер движения шайбы после первого соударения с поверхностью. Если оно больше нуля, шайба после отскока продолжает движение по горизонтали. А как будет двигаться шайба, если $\cos\alpha - 2\mu\sin\alpha < 0$? Физический смысл таков: очевидно, что шайба не станет двигаться назад, против оси x, она только погасит до нуля горизонтальную проекцию скорости и начнет просто подпрыгивать по вертикали.

Произведем расчет: при первом ударе $\cos\alpha - 2\mu\sin\alpha = \frac{\sqrt{3}}{2} - 2\cdot 0{,}5\cdot\frac{1}{2} > 0$, значит, шайба продолжит движение вправо. Найдем теперь проекцию скорости шайбы после второго удара:

$$v_{2x} = v_{1x} - 2\mu v_{0y} = v_{0x} - 4\mu v_{0y} = v_0(\cos\alpha - 4\mu\sin\alpha) .$$

На этот раз выражение в скобках меньше нуля (убедитесь в этом), и шайба перестанет смещаться вправо. Для определения искомого расстояния s учтем, что время полета шайбы равно

$$t = \frac{2v_{0y}}{g} .$$

Таким образом, смещение шайбы вдоль горизонтальной оси составит

$$s = v_{1x}t = v_{1x}\frac{2v_{0y}}{g} = \frac{2v_0^2}{g}(\cos\alpha - 2\mu\sin\alpha)\sin\alpha = 0{,}75 \text{ м} .$$

(Окончание следует)