

## ВЕДЁРКО С ЗАГАДКАМИ

*Были бы Ньютоны, а яблоки у нас найдутся!*

Мой приятель, здоровенный двухметровый дядя, рассказывал: «Помнил я ещё со школы, что если взять за ручку ведро с водой и сильно его раскрутить, то ни капли воды из него не прольётся. А мы как раз новый чайник купили. Ну, я и решил показать детям фокус...» Дальше рассказ детей: «Папа позвал нас на кухню. Посадил. Налил в чайник воды. Размахнулся и разбил его о потолок!»

Классический опыт жанра занимательной науки, каждый раз демонстрируешь это чудо, и дух захватывает. А ещё голову ломаешь, как показать его школьникам на представлении Театра Занимательной Науки, чтобы даже знающим было интересно...

Сегодня, мы собираемся в очередной раз выйти сухими из-под воды и поставить забаву на службу науке. Детское ведёрко для игр приготовлено, водой на две трети наполнено, надёжность крепления ручки проверена. Присоединяйтесь!

Загадка первая.

*Почему при быстром вращении ведёрка из него не выливается вода, даже когда оно находится в перевёрнутом состоянии над головой?*

Казалось бы, всё просто – центробежная сила (кто про неё не слышал?) уравнивает силу тяжести. Это самый популярный ответ. Однако, центробежная сила инерции – фикция<sup>1</sup>, не существующая в природе. Правда, хитрые физики порой используют её при переходе в ускоренно движущиеся системы отсчёта (неинерциальные), ради того, чтобы продолжать в них пользоваться законами Ньютона для расчёта ускорения тел через баланс сил. Отсюда и заблуждение.

Начинаем разбирательство издали, точнее свысока: скатываем с горки тяжёлый шарик. По куску грубой ткани, расстеленной на полу, он укатывается недалеко. Без неё – много дальше. Далее – мысленный эксперимент с идеально гладкой поверхностью. По ней шарик движется прямолинейно, с неизменной скоростью и теряется в бесконечности! Фантазия приводит нас к первому закону Ньютона – закону инерции, который в шуточной формулировке звучит так: «Тело, на которое не действуют силы со стороны других тел, желает находиться в состоянии покоя или прямолинейного движения, поэтому отстаньте от него!» Знатоков этой истины можно узнать по специфическому проявлению лени: при поездке в автобусе, желая встать с сиденья, они используют инерцию от его торможения. Справедливо для закона и обратное проявление: если на тело действуют нескомпенсированные силы, то оно меняет свою скорость. Забавная игрушка подтверждает вышесказанное: скатывающийся по проволочной дорожке шарик, делает «мёртвую петлю». При достаточном запасе энергии, он проходит верхнее положение петли без отрыва от неё. В каждой точке своего кругового пути, шарик по инерции стремится двигаться по прямой линии, касательной к окружности. Но этому мешает проволочная опора, постоянно изменяющая направление его движения. Полная аналогия с водой в ведре, а также с лётчиком, выполняющим на самолёте круговой виток в вертикальной плоскости.



<sup>1</sup> Представьте, что вы стоите в автобусе, который резко тормозит. Вы падаете, якобы под действием силы инерции  $\vec{F}_i = -m\vec{a}$ . Но сила – это всегда действие одного тела на другое. Попробуйте отыскать тело, которое вас толкнуло вперёд... Нет тела, нет взаимодействия, нет силы инерции! Но всё проясняется, если смотреть на произошедшее с тротуара (из инерциальной системы отсчёта): сила трения тормозит ноги, а тело человека продолжает первоначальное движение.

Идею возможной «воздушной петли» выдвинул профессор Н.Е. Жуковский и долгое время она жила лишь на бумаге. Первым в мире (в 1913 году) её реализовал в небе военный лётчик Пётр Нестеров. (Испытайте гордость за соотечественников!)

Недоброжелателям (были и такие) он объяснял:

*Не для забавы иль задора,  
А вас мне нужно убедить,  
Что в воздухе везде опора.  
И одного хочу лишь я,  
Свою петлю осуществляя,  
Чтобы «мёртвая петля»,  
Была бы в воздухе «живая».*

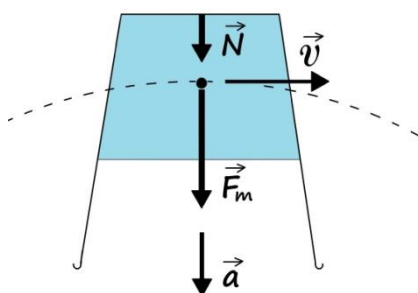
Нестеров так доверял своим расчётам, что перед выполнением полёта не пристегнулся ремнями к креслу пилота. Расчёт летчика оказался правильным: ремни не понадобились!

Загадка вторая.

*С какой минимальной скоростью надо вращать ведро, чтобы не пролить воду?*

Вспоминается некорректный, но уместный анекдот: «Эстонский спутник, запущенный в прошлом году, успешно завершил первый виток вокруг Земли». Если запустить шарик по мёртвой петле со второй, нижней позиции, то он (не из-за эстонской медлительности, а по другой причине<sup>2</sup>) не обретёт нужной скорости и упадёт с дорожки.

Желающим познать причину, рекомендуется уличный эксперимент с ведром, в доньшке которого сделано маленькое отверстие.



При вращении из него будет непрерывно бить струя воды, даже тогда, когда ведро будет вверх дном. Чем медленнее будет двигаться ведро, тем слабее будет фонтанирование. Можно добиться, чтобы в верхнем положении фонтан прекратил свою работу. При этом дно ведра перестаёт давить на воду ( $N = 0$ ), а вода (по III закону Ньютона) на дно. Если ещё немного замедлить движение, то вода из перевернутого ведра выльется, и придёт осознание: чтобы не намокнуть, нужна скорость, при которой центростремительное ускорение будет не меньше ускорения свободного падения ( $g = 9,8\text{ м/с}^2$ )<sup>3</sup>.

Мокрая голова – небольшая плата за истину.

Центростремительное ускорение ( $a$ ) вычисляется по формуле:

$$a = V^2/R,$$

где  $V$  – круговая скорость, а  $R$  – радиус окружности. Таким образом, имеем неравенство:

$$V^2/R \geq g.$$

Принимая движение по окружности за равномерное, а радиус – 0,7м, находим критическую скорость. Она примерно равна 2,6м/с, что соответствует одному обороту за 1,7 секунды. Подобный период обращения вполне достигим, и опыт удастся без труда.

Загадка третья.

*В ведре на поверхности воды плавает мячик. Из-*



<sup>2</sup> См. закон сохранения полной механической энергии.

<sup>3</sup> Иначе, в гонке по вертикали, вода обгонит ведро.

*менится ли глубина его погружения при вращении ведёрка?*

Вопрос вызывает горячие споры. Проведение эксперимента ситуацию не проясняет: красный мячик из прозрачного ведёрка не выпадает, но разглядеть изменение его осадка не удаётся. Нужна аналитика. Можно предложить подумать об этом на досуге, но все присутствующие хотят правды здесь и сейчас. Да будет так. Загадка упрощается (до частного случая) и превращается в школьную задачу: «В лифте находится ведро с водой, в котором плавает мячик. Изменится ли глубина его погружения, если лифт будет двигаться с ускорением, направленным вверх? Вниз?»

От шутливого замечания «вода выталкивает предметы потому, что обижается», приходим к пониманию условия равновесия сил тяжести и Архимеда для плавающего в неподвижном лифте мячика:

$$mg = \rho_{\text{в}}gV_{\text{в}},$$

где  $m$  – масса плавающего тела,  $V_{\text{в}}$  – объём вытесненной воды, а  $\rho_{\text{в}}$  – её плотность.

Как-то раз, после появления буквы «ро», раздался изумлённый голос: «Ой! Головастик!». Сегодня – полное понимание: никаких «сил Архимеда» и «целеустремительных ускорений»... Мы приглашаем в гости хитрого физика – любителя неинерциальных систем отсчёта, заходим с ним в кабинку лифта и смотрим на всё ускоренно движущимися глазами. Здесь вес покоящегося тела равен  $m(g \pm a)$ . Знак «плюс» соответствует ускорению, направленному вверх, а знак «минус» – ускорению, направленному вниз. Можно сказать, что в «волшебной» кабине просто происходит замена  $g$  на  $g \pm a$ . Однако, в связанной с лифтом неинерциальной системе отсчёта, сила Архимеда  $\rho_{\text{в}}gV_{\text{в}}$  изменяется во столько же раз, во сколько раз изменяется вес  $mg$  мячика. Значит, равновесие сохраняется без изменения объёма вытесненной воды  $V_{\text{в}}$ , и осадка мячика при ускоренном движении как вверх, так и вниз, остаётся первоначальной.

После виртуального путешествия по вертикали, нетрудно применить приобретённые знания, к вращающемуся ведёрку...

Желаете подтвердить хитроумную теорию? Тогда, опустите в воду чувствительный поплавок и с этим оборудованием зайдите в реальный пассажирский лифт<sup>4</sup>...



05.08.19

<sup>4</sup> Но не забудьте, что его кабина движется ускоренно лишь в начале и в конце своего пути.