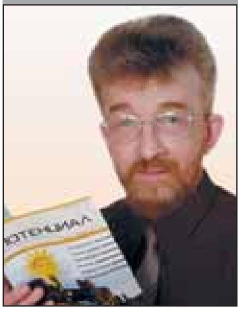

Лукьянов Андрей Александрович
Кандидат физико-математических наук, закончил физический факультет МГУ, преподаватель кафедры общей физики Московского физико-технического института, сотрудник РНЦ «Курчатовский институт», доцент Российского государственного социального университета.

Механика в числах – больших и маленьких

В статье, адресованной старшеклассникам, рассмотрено несколько поучительных и для многих, возможно, неожиданных примеров «на числа» из механики. Все они взяты «из жизни» (быта, техники, спорта).

Иногда говорят, что физика – наука точная. Точная она или нет – вопрос не такой простой, может быть – только приближённая. Во всяком случае, физика – наука количественная. А это значит, что она оперирует с величинами, то есть, в конце концов, с числами. Опыт преподавания физики показывает, однако, что учащиеся школ и студенты вузов, не обязательно из числа отстающих, весьма смутно представляют себе, с величинами какого масштаба имеют дело, даже «зная» законы физики и формулы в буквах. В настоящей заметке автор хотел бы поговорить о числах в механике – одном из разделов физики.

Пример 1. Может ли человек бежать со скоростью 40 км/ч?

Решение. Спросите кого-нибудь из знакомых: «Может ли человек бежать со скоростью 40 км/ч?». Вы, скорее всего, услышите отрицательный ответ. Даже если Вы уточните, что не обязательно бежать именно час, что можно и меньше, можно всего 100 метров, – даже и в этом случае ответом Вам будет, скорее всего, сомнение. Между тем, большинство людей знает, что стометровку лучшие спортсмены бегут примерно за 10 секунд (мировой рекорд равен 9,77 с). Но ведь скорость 100 м/10 с = = 10 м/с – это 36 км/ч. Многие помнят, что существует переводной множитель «3,6» между м/с и км/ч. Вот только что именно на эти «3,6» надо делить, а что умножать, – это, к сожалению, помнят не все. Автор этих строк, между прочим, как раз на примере бегуна на 100 м запомнил правило перевода:

$$v\ \text{м/с} = 3{,}6 \cdot v\ \text{км/ч}.$$

Его просто удивило, что тот бежит так быстро, так и хочется сказать, что в км/ч спринтер бежит значительно быстрее, чем в м/с.

Кстати, в процессе бега лучшие спортсмены, на самом-то деле, большую часть дистанции бегут ещё быстрее. Ведь первые метры её им приходится тратить на разгон, и лишь после этого они переходят на бег с примерно постоянной скоростью. Сделаем оценку.

Пример 2. Лучшие спринтеры мира пробегают $s = 100$ м примерно за $T = 10$ с; при этом на разгон тратится $t = (2 \div 3)$ с. Оценить скорость v равномерного движения спринтеров.

Решение. Средняя скорость на первом (равноускоренном) участке дистанции равна $\dfrac{v}{2}$, поэтому для нахождения v имеем уравнение

$$s = \frac{v}{2}t + v(T - t).$$

Откуда находим

$$v = \frac{s}{T - \frac{t}{2}} = (40 \div 42) \text{ км/ч}.$$

Пример 3. Может ли самолёт за 1 секунду пролететь 1 км?

Решение. Кажется сомнительным, чтобы самолёты летали так быстро. Глядя на медленно «ползущий» в небе самолёт, трудно поверить, что самолёты могут быть такими резвыми; между тем, это – факт. Самые быстрые самолёты могут, как говорят специалисты, «делать три Маха». Это означает, что они могут летать со скоростью в 3 раза большей, чем скорость звука в воздухе. Последняя порядка $330 \div 350$ м/с, то есть $\dfrac{1}{3}$ км/с. Значит, 3 скорости звука – это как раз 1 км/с. Разумеется, такие скорости имеют не пассажирские самолёты, а военные (отечественный МИГ-25 и американский SR-71). Из пассажирских самолётов только «Конкорд» и ТУ-144 преодолевали рубеж скорости звука,

достигая скорости 2200 км/ч $\approx$ 610 м/с. Кстати, даже для самых ультрасовременных самолётов скорость в «4 Маха» пока недостижима.

Пример 4. Как быстро могут летать космические корабли?

Решение. Оказывается, космические корабли почти на порядок быстрее самых быстрых самолётов. Космический корабль на околоземной орбите имеет скорость $\approx 7{,}9$ км/с, а это почти в 8 раз быстрее, чем скорость самого быстрого самолёта. Если бы космический корабль летел с такой скоростью над Москвой, он пересёк бы её по «диаметру» примерно за 4 секунды. Переведём ещё эту скорость в км/ч: 8 км/с = 8000 м/с = $3{,}6 \cdot 8000$ км/ч = 28 800 км/ч. Но «29 тыс. км» – это уже существенно больше, чем «от Москвы до самых до окраин». И это за 1 час!

Пример 5. Пока космический корабль ещё только выводится на орбиту, из его сопла вырывается назад струя газа, имеющая относительно корабля огромную скорость – порядка 2,5 км/с. Подчеркнём, это скорость относительно космического корабля! А представьте себе, что корабль уже набрал скорость 2,5 км/с относительно Земли. С какой же скоростью относительно Земли (атмосферы Земли, воздуха) будет в этот момент лететь струя газа?

Решение. Ответ очевиден, но невероятен: с нулевой скоростью! Ещё более удивительно то, что когда скорость корабля станет больше, чем 2,5 км/с (а она рано или поздно должна достичь значения 7,9 км/с), то газы начнут улетать от Земли вслед за кораблём! Другими словами, относительно корабля газы по-прежнему будут лететь назад, но с точки зрения земного наблюдателя они, хотя и отставая от корабля, будут двигаться в ту же сторону, что и он. Когда автор рассказал об этом одному знакомому инженеру, интересующемуся стрелковым оружием, тот сначала не поверил автору. Просто он всегда имел дело со скоростями не столь больших величин. Например, скорость пули при вылете из автомата Калашникова «всего» 0,715 км/с. Такая пуля не догонит сверхскоростной самолёт.

Пример 6. Знаете ли вы, сколько газа вырывается из сопла ракеты за 1 секунду?

Решение. Оказывается, *за 1* секунду из сопла ракеты вырывается газа весьма немало. Для нашего космического корабля «Союз» – это примерно полторы тонны! (Один легковой автомобиль!) Имеется в виду – из всех 4-х двигателей 1-ой ступени. А для американской ракеты «Saturn-5», выводившей на орбиту космический корабль «Appolo-11», доставивший 20 июля 1969 г. первых астронавтов на Луну, расход горючего составлял на старте примерно 12 тонн в секунду!

Пример 7. Определить линейную скорость вращения точек земной поверхности на широте Санкт-Петербурга (60°) и на экваторе. Радиус Земли R = 6370 км.

Решение. Скорость на широте Санкт-Петербурга вычисляем по формуле

$$v = \frac{2\pi}{T} R \cos 60^\circ,$$

а на экваторе $v = \frac{2\pi}{T} R$. Здесь у многих ещё возникает вопрос: что подставлять в качестве T? Забывают, что речь идёт не вообще о вращении, а о вращении Земли вокруг собственной оси. Но период обращения $\approx$ 24 часа = $24 \cdot 3600$ сек. Точно так же, когда речь заходит о вращении Земли вокруг Солнца, часто не могут сообразить, что период составляет 365 дней. Можно, конечно, не помнить длительность лунного месяца (27,3 суток), но не сообразить, какого порядка здесь числа, – это уже плохо. Итак, мы получаем ответ: на широте Санкт-Петербурга скорость вращения точек земной поверхности равна v = 232 м/с = 834 км/ч, а на экваторе v = 464 м/с = 1668 км/ч.

Скорость 834 км/ч порядка скорости турбовинтового самолёта, а скорость 464 м/с – это уже больше скорости звука в воздухе ($\approx$340 м/с). Почему же мы не ощущаем этой скорости? Спросим себя, однако: «А разве в самолёте мы ощущаем его скорость, скажем, 850 км/ч?» Мы вообще не ощущаем скорость, о чём писал ещё Галилей (хотя писал, конечно, не о самолётах). Другое дело с ускорением. В самолёте во время его разгона и во время посадки мы его замечательно чувствуем. Даже на вращающейся карусели (движущейся отнюдь не со скоростью самолёта) чувствуется ускорение! Почему же мы не чувствуем ускорение, связанное с вращением

Земли вокруг своей оси? В следующем примере разберёмся с ускорением точек земной поверхности.

Пример 8. Определить центростремительное ускорение точек земной поверхности на широте Санкт-Петербурга (60°) и сравнить его с ускорением свободного падения.

Решение. Теперь действуем по формуле

$$a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 R\cos 60^\circ.$$

После подстановки чисел получаем $a = 0{,}0168\ \text{м}/\text{с}^2$, что в 580 раз меньше, чем $g = 9{,}8\ \text{м}/\text{с}^2$. Ускорение, как мы видим, оказалось чрезвычайно маленьким по сравнению с ускорением свободного падения, поэтому мы и не ощущаем вращения Земли. При вращении карусели, как ни странно, ускорение больше; ещё больше оно в центрифугах, на которых тренируют космонавтов.

А какие перегрузки испытывают космонавты в полёте? Когда космический корабль уже на орбите и его двигатели выключены, космонавт вообще пребывает в невесомости. Там о перегрузках речь идти не может. А что же во время старта?

Пример 9. Масса космического корабля «Союз» на старте вместе с горючим $M \approx 300$ тонн (примерно 300 автомобилей!). Суммарная сила тяги всех четырёх двигателей первой ступени $F \approx 4\times10^6$ Н. Определить кратность перегрузки космонавтов во время старта.

Решение. Кратностью перегрузки называют величину $\frac{N}{mg}$, где mg – сила тяжести, N – сила, с которой космонавт давит на кресло в космическом корабле. Последняя (по 3-му закону Ньютона) равна по абсолютной величине силе реакции, действующей на космонавта со стороны кресла, в котором он сидит. Именно сила реакции совместно с силой тяжести сообщают космонавту ускорение вверх. Запишем уравнение движения космонавта:

$$ma = N - mg.$$

Отсюда находим

$$\frac{N}{mg} = 1 + \frac{a}{g}.$$

Ускорение a найдём из уравнения движения космического корабля:

$$a = \frac{F - Mg}{M} \approx 3{,}53\ \text{м}/\text{с}^2.$$

Для кратности перегрузки космонавта получаем оценку $\frac{N}{mg} \approx 1{,}36$. «Так мало? – удивится читатель. – А ещё говорят, будто космонавты испытывают сверхперегрузки, что для этого нужно тренироваться на центрифугах!». Малая перегрузка «1,36», которую мы получили, относится только к самому начальному этапу полёта. Пока ракета ещё очень тяжёлая, даже большая сила тяги ракеты не в состоянии сообщить ей значительное ускорение. Но ракета за счёт вылета газов из сопла каждую секунду теряет в массе примерно полторы тонны, т. е. за 1 минуту – порядка 100 тонн (при массе на старте в 300 тонн). По мере расхода горючего ускорение ракеты стремительно возрастает. Вот тут-то и возникают сверхперегрузки.

Перегрузки у лётчиков тоже порой бывают весьма велики. Решите самостоятельно сформулированную ниже задачу.

Пример 10. Реактивный самолёт, движущийся со скоростью 1800 км/ч, выполняет манёвр и летит по дуге радиусом 3 км. Чему равно центростремительное ускорение самолёта, выраженное в g? Оценить кратность перегрузки. **Ответ**: $8{,}5g$, $\approx 8{,}5$.

Даже очень тренированный космонавт в состоянии переносить долго лишь перегрузки не более 10 (примерно в течение 40 с). При аварийных посадках космических кораблей перегрузки достигали иногда 22. Правда, очень короткое время мы все в состоянии переносить значительно бо́льшие перегрузки. Рассмотрим в следующем примере такую (совершенно безобидную) жизненную ситуацию.

Пример 11. Человек прыгает с высоты $h = 1$ м в одном случае на прямые ноги, а в другом – сгибая ноги в коленях. Времена торможения при соприкосновении с опорой соответственно равны $\Delta t_1 = 0{,}01$ с и $\Delta t_2 = 0{,}3$ с. Вычислим кратности перегрузок, которые при этом возникают, считая торможение равнозамедленным движением.

Решение. По второму закону Ньютона

$$ma = N - mg,$$

где N – сила реакции со стороны Земли, a – ускорение человека. Отсюда находим

$$N = m(g + a) \text{ и}$$

$$\frac{N}{mg} = 1 + \frac{a}{g} = 1 + \frac{\frac{\sqrt{2gh}}{\Delta t}}{g} = 1 + \frac{1}{\Delta t}\sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

В случае приземления на прямые ноги мы получили бы очень большую перегрузку $\frac{N}{mg} \approx 46$; в случае сгибания ног перегрузка значительно меньше $\frac{N}{mg} \approx 2{,}5$.

Примеры для самостоятельного решения

1. Какой длины должна быть взлётная полоса для самолёта ИЛ-62, если для взлёта самолёту необходимо иметь скорость 300 км/ч, а его двигатели могут обеспечить движение по взлётной полосе с ускорением $1{,}6$ м/с^2. **Ответ**: 2,17 км.

2. Автомобиль врезался в столб со скоростью 100 км/ч. Падению с какой высоты эквивалентен этот удар? **Ответ**: $h = 39$ м.

3. Найти линейную скорость вращения Луны вокруг Земли. Период вращения – 27,3 суток; среднее расстояние от Земли до Луны – $3{,}84 \cdot 10^5$ км. **Ответ**: 1 км/с – скорость современного самолёта, делающего «3 Маха».

4. Найти линейную скорость вращения Земли вокруг Солнца. Среднее расстояние от Земли до Солнца – 149 млн. км. **Ответ**: 30 км/с.