

Урок 6. Реактивное движение

Физика вокруг нас · ~35 минут

Как ракета летит в космосе, где не от чего оттолкнуться? Ей не нужен воздух, не нужна опора — она отталкивается от **собственного выброшенного топлива**. За этим стоит один из самых красивых законов физики: закон сохранения импульса. Тот же закон объясняет, почему отдаёт ружьё и почему, стоя на скейте, нельзя дунуть себе в парус. Сегодня запустим шарик по нитке и посчитаем отдачу.

Что ты узнаешь

- Что такое импульс и почему он сохраняется.
- Как из закона сохранения импульса рождается реактивная тяга.
- Почему ракета летит в пустоте, где нет опоры.
- Как оценить скорость отдачи (ружья, лодки, человека).

Разбираемся в теме

Импульс: что это такое


Представь, что тебе навстречу катятся два предмета, и оба надо остановить рукой. Первый — теннисный мячик, летящий не спеша. Второй — тот же мячик, но пущенный со всей силы. Понятно, что второй остановить труднее: в нём «больше движения». А если вместо мячика едет тележка? Даже медленную тяжёлую тележку остановить труднее, чем быстрый лёгкий мячик.

Значит, «количество движения» зависит и от массы, и от скорости. Физики придумали для этого точную величину — **импульс**:

$$p = m \cdot v$$

то есть масса, умноженная на скорость. Разберём, откуда каждая буква:

- **m** — масса тела (в килограммах),
- **v** — его скорость (в метрах в секунду),
- **p** — сам импульс. Его размерность получается перемножением: $\text{кг} \cdot (\text{м/с}) = \text{кг} \cdot \text{м/с}$.

 **Запомни:** импульс $p = m \cdot v$ — это «мера движения» тела. Чем тяжелее тело и чем быстрее оно движется, тем больше его импульс.

Важная тонкость: импульс — величина **векторная**, у неё есть направление (туда же, куда летит тело). Скорость ведь тоже вектор: «5 м/с вправо» и «5 м/с влево» — это разные скорости. Поэтому у импульса тоже важен знак: договоримся, что движение в одну сторону будем считать положительным (+), а в противоположную — отрицательным (-). Это нам скоро очень пригодится.

Из-за того, что важна и масса, и скорость, тяжёлый грузовик, ползущий еле-еле, и крошечная пуля, летящая со свистом, могут иметь **одинаковый импульс**.


Проверим на числах: грузовик 10 000 кг на скорости 0,7 м/с даёт $p = 10\,000 \cdot 0,7 = 7000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. А пуля 0,01 кг на скорости 700 000 м/с... нет, столько не бывает; но пуля 10 кг (снаряд!) на 700 м/с даёт ровно те же $10 \cdot 700 = 7000 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Разные тела — один импульс.

Закон сохранения импульса: почему сумма не меняется

Теперь самое главное. Возьмём **систему** — несколько тел, которые нас интересуют (например, «ружьё и пуля» или «космонавт и инструмент»). Силы бывают двух видов:


- **внешние** — от тел вне системы (тяготение Земли, трение о пол, чья-то рука),
- **внутренние** — с которыми тела системы действуют **друг на друга** (пороховые газы толкают пулю, пуля толкает ружьё).

Систему называют **замкнутой**, если внешних сил нет (или они друг друга уравновешивают, или мы смотрим на такое короткое время, что они не успевают ничего сделать).

 **Запомни:** в замкнутой системе (на которую не действуют внешние силы) суммарный импульс сохраняется — остаётся постоянным по величине и направлению.

Почему это так? Вспомни **третий закон Ньютона**: если тело А действует на тело В с некоторой силой, то В действует на А с точно такой же силой, но в противоположную сторону. Силы равны по величине и противоположны по направлению.

А раз силы равны и противоположны и действуют одно и то же время, то и «толчки», которые они дают, равны и противоположны. Один толчок добавляет телу А импульс, скажем, $+5 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$, а второй добавляет телу В ровно $-5 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$. В сумме: $+5 + (-5) = 0$. **Общий импульс не изменился!** Как бы тела внутри системы ни толкались, ни взрывались, ни разлетались — их внутренние силы всегда идут парами «плюс–минус» и в сумме дают ноль. Поэтому внутренние силы **не могут** изменить суммарный импульс системы.

 **Интуиция:** нельзя приподнять себя, дёрнув за собственные волосы. И нельзя разогнать систему, толкаясь только изнутри. Чтобы изменить общий импульс, нужен кто-то или что-то **снаружи**.

Разлёт из покоя: откуда берётся отдача

Разберём самый чистый и важный случай — когда система сначала **покоится**, а потом разлетается на две части. Именно так работают и ружьё, и ракета, и прыжок с лодки.

Шаг 1. До. Система неподвижна. Раз всё стоит, скорости равны нулю, значит и импульсы равны нулю. Суммарный импульс всей системы:

$$p_{\text{до}} = 0.$$

Шаг 2. После. Система распалась на две части: часть 1 (масса m_1 , скорость v_1) и часть 2 (масса m_2 , скорость v_2). Их суммарный импульс:

$$p_{\text{после}} = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2.$$

Шаг 3. Приравниваем. По закону сохранения импульса $p_{\text{после}} = p_{\text{до}}$, а $p_{\text{до}}$ у нас ноль:

$$m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2 = 0.$$

Шаг 4. Выражаем. Перенесём второе слагаемое вправо:


$$m_1 \cdot v_1 = -m_2 \cdot v_2, \text{ откуда:}$$

$$v_1 = - \frac{m_2}{m_1} \cdot v_2$$

Скорость отдачи: чем легче тело (m_1), тем быстрее оно отскакивает.

Что означает «минус»? Помнишь, мы договорились: одна сторона — плюс, другая — минус? Знак «минус» здесь говорит: если часть 2 полетела в одну сторону (скажем, вправо, $v_2 > 0$), то часть 1 обязательно летит в **противоположную** (влево, $v_1 < 0$). Части всегда разлетаются в разные стороны — иначе их импульсы не смогли бы сократиться в ноль.

Что означает дробь (m_2/m_1)? Скорость части 1 равна скорости части 2, умноженной на отношение масс. Если часть 1 **тяжёлая**, а часть 2 **лёгкая**, то m_2/m_1 — маленькое число, и v_1 получается маленькой. Лёгкая часть улетает быстро, тяжёлая откатывается медленно. Это и есть **отдача**.

 **Интуиция:** взрослый и ребёнок на льду оттолкнулись друг от друга. Ребёнок отъезжает быстро, взрослый — еле-еле. Импульсы у них равны по величине и противоположны, а скорости — обратно пропорциональны массам.

Откуда реактивная тяга

Ракета — это тот же «разлёт из покоя», только часть 2 (топливо) выбрасывается не разом, а струёй газа. Ракета выбрасывает назад газ с большой скоростью. Газ уносит импульс назад — значит ракета получает точно такой же импульс вперёд. Никакой воздух и никакая опора не нужны: ракета **отталкивается от собственного выброшенного вещества**.

Почему же ракета летит в пустоте? Разберём по шагам. Чтобы получить импульс вперёд, ракете нужно оттолкнуть что-то назад. Крыло самолёта отталкивает воздух, вёсла — воду, ноги бегуна — землю. Но у ракеты есть своё «что-то» — она возит топливо с собой и выбрасывает **его**. Ей совершенно не важно, есть ли снаружи воздух: она отталкивается от газа из своих сопел, а не от атмосферы. Поэтому в вакууме космоса ракета работает **прекрасно** — и даже лучше, чем в атмосфере, где воздух только тормозит и мешает.

⚠ Частая ошибка: думать, что ракета «отталкивается от воздуха».

Наоборот: в безвоздушном пространстве реактивный двигатель эффективнее, ведь атмосфера только тормозит. Ракета отталкивается от газа, который сама же извергает.

Теперь получим **силу тяги** — по шагам, из того же импульса. Пусть за малый промежуток времени Δt ракета выбрасывает порцию газа массой Δm со скоростью истечения u (это скорость газа относительно ракеты).

Шаг 1. Порция газа уносит назад импульс, равный (масса)·(скорость) = $\Delta m \cdot u$. **Шаг**

2. По закону сохранения ракета получает вперёд ровно такой же импульс: $\Delta m \cdot u$.

Шаг 3. Сила — это как раз «сколько импульса получено в единицу времени» (толчок, делённый на время толчка). Значит, делим полученный импульс на время Δt :

$$F_{\text{тяги}} = (\Delta m \cdot u) / \Delta t = u \cdot (\Delta m / \Delta t),$$

то есть тяга равна скорости истечения, умноженной на **расход топлива** $\Delta m / \Delta t$ (сколько килограммов газа выбрасывается в секунду). Вывод простой и

полезный: хочешь большую тягу — **выбрасывай газ быстро (большое u) и помногу (большой расход).**

🤔 **А знаешь ли ты?** У двигателей ракеты «Сатурн-5», доставившей людей на Луну, скорость истечения газов была $\sim 2,4$ км/с, а расход — около 13 тонн в секунду! Отсюда тяга $\sim 3,4 \times 10^7$ Н — как у 30 миллионов ньютонов, чтобы оторвать от Земли машину массой 2900 тонн.

Реактивное движение вокруг нас

- **Отдача ружья.** Пуля летит вперёд, ружьё бьёт в плечо назад — тот же $m_1 v_1 = m_2 v_2$.
- **Прыжок с лодки.** Прыгаешь на берег — лодка уезжает назад. Ты и лодка «разлетаетесь».
- **Медуза и кальмар.** Кальмар выбрасывает струю воды и получает толчок в обратную сторону — живая ракета.
- **Надутый шарик.** Отпусти надутый воздушный шарик — воздух вылетает назад, шарик мечется вперёд. Это ракета в чистом виде.



Опыт дома

Шарик-ракета на нитке.

Возьми: длинную нитку (2–4 м), коктейльную трубочку (или кусок от неё ~ 4 см), скотч, воздушный шарик, две опоры (спинки стульев).

1. Пропусти нитку сквозь трубочку.
2. Натяни нитку горизонтально между двумя стульями через всю комнату и закрепи концы.
3. Надуй шарик, но **не завязывай** — держи горлышко зажатым пальцами.
4. Скотчем приклей шарик к трубочке (шарик снизу, горлышком в сторону старта).

5. Отпусти горлышко. Воздух с шипением вырывается назад — шарик-ракета мчится вперёд по нитке!

Почему: выходящий воздух уносит импульс назад, шарик получает равный импульс вперёд. Это ровно наш «разлёт из покоя»: до старта система «шарик + воздух внутри» покоится (суммарный импульс ноль), а после — воздух летит в одну сторону, шарик в другую, и их импульсы в сумме по-прежнему ноль. Нитка нужна лишь чтобы задать прямую траекторию, — толкает шарик именно вылетающий воздух, а не она. Попробуй сравнить: длинный узкий шарик разгонится сильнее круглого — у него больше воздуха вылетает направленной струёй.

Это же и есть «**бутылочная ракета**» в миниатюре. Если налить в бутылку немного воды, накачать внутрь воздух под давлением и открыть — вода мощной струёй бьёт вниз, унося большой импульс назад, а бутылка прыгает вверх, получая такой же импульс вперёд. Вода тяжелее воздуха, поэтому уносит больше импульса при той же скорости — и «ракета» летит выше.



Разбор примера

Задача. Человек массой 60 кг стоит на лёгких роликах (трение считаем нулевым) и бросает вперёд мяч массой 0,5 кг со скоростью 8 м/с. С какой скоростью откатится человек назад?

Решение по шагам.

1. **Записываем систему.** Система «человек + мяч». Трения нет, значит внешних горизонтальных сил нет — система замкнута, импульс сохраняется.
2. **До броска.** Всё покоится, суммарный импульс равен нулю: $p_{\text{до}} = 0$.
3. **После броска.** Импульсы человека и мяча должны в сумме дать тот же ноль: $m_{\text{чел}} \cdot v_{\text{чел}} + m_{\text{мяч}} \cdot v_{\text{мяч}} = 0$.
4. **Выражаем по модулю.** Переносим и берём величины (про знак «минус» помним — он лишь скажет, что человек едет назад): $m_{\text{чел}} \cdot v_{\text{чел}} = m_{\text{мяч}} \cdot v_{\text{мяч}}$, то есть $60 \cdot v_{\text{чел}} = 0,5 \cdot 8$.

5. **Считаем правую часть.** $0,5 \cdot 8 = 4$ (кг·м/с — это импульс, который унёс мяч).

6. **Делим на массу человека.** $v_{\text{чел}} = 4 / 60 \approx 0,067$ м/с — около 7 сантиметров в секунду, назад.

Проверка здравым смыслом: человек в 120 раз тяжелее мяча ($60 / 0,5 = 120$),

поэтому его скорость в 120 раз меньше скорости мяча: $8 / 120 \approx 0,067$ м/с.

Сходится. Всё логично: лёгкий мяч летит быстро, тяжёлый человек откатывается еле-еле.

Задача 2 (отдача ружья). Ружьё массой 4 кг стреляет пулей 10 г со скоростью 700 м/с. Найди скорость отдачи ружья.

Решение по шагам.

1. **Переводим единицы.** Массу пули берём в килограммах: $10 \text{ г} = 0,010 \text{ кг}$ (в 1000 раз меньше). Это важно — масса ружья дана в кг, всё должно быть в одних единицах.

2. **До выстрела.** Ружьё с пулей покоятся, суммарный импульс равен нулю.

3. **После выстрела.** Пуля летит вперёд, ружьё — назад, их импульсы в сумме дают ноль: $m_{\text{руж}} \cdot v_{\text{руж}} = m_{\text{пули}} \cdot v_{\text{пули}}$ (по модулю).

4. **Подставляем числа.** $4 \cdot v_{\text{руж}} = 0,010 \cdot 700$.

5. **Считаем импульс пули.** $0,010 \cdot 700 = 7$ (кг·м/с).

6. **Делим на массу ружья.** $v_{\text{руж}} = 7 / 4 = 1,75$ м/с назад.

Плечо смягчает этот удар, растягивая его во времени, — иначе было бы больно.

(Вспомни формулу тяги: та же идея — чем дольше длится толчок, тем меньше сила при том же импульсе.)



Задачи

1. Космонавт массой 90 кг (в скафандре) неподвижно висит в открытом космосе и бросает от себя инструмент массой 2 кг со скоростью 5 м/с. С какой скоростью и куда полетит космонавт?

2. Мальчик массой 40 кг прыгает с неподвижной лодки массой 120 кг на берег со скоростью 3 м/с. Какую скорость приобретёт лодка?
3. Ракета выбрасывает газ со скоростью истечения 2000 м/с при расходе 5 кг/с. Чему равна сила тяги?
4. Тележка с песком общей массой 20 кг едет по гладким рельсам со скоростью 2 м/с. На неё сверху вертикально падает и застревает груз 5 кг. Какой станет скорость тележки? (Подсказка: вертикальный импульс груза не меняет горизонтального.)
5. Два конькобежца, 50 кг и 70 кг, стоят на льду лицом друг к другу и отталкиваются. Лёгкий откатывается со скоростью 4,2 м/с. С какой скоростью поедет тяжёлый?
6. Оцени, во сколько раз кинетическая энергия пули больше кинетической энергии ружья при отдаче в примере выше (пуля 10 г, 700 м/с; ружьё 4 кг, 1,75 м/с). Почему энергии так различаются, хотя импульсы равны? (Подсказка: $E = p^2/2m$.)
7. Почему нельзя сдвинуть парусную лодку, дую в её парус из вентилятора, установленного на самой лодке? Разбери через импульс системы «лодка + вентилятор + струя воздуха».
8. Ракета в вакууме имеет скорость истечения газов 3 км/с. Чтобы разогнать её до 3 км/с, она по формуле Циолковского должна выбросить около 63% своей начальной массы в виде топлива. Объясни на пальцах (через сохранение импульса), почему для большей скорости нужно непропорционально больше топлива.