

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА МАНГА

МЕХАНИКА

Хидео Нитта
Кейта Такацу
Trend-Pro Co., Ltd.



ДОЭКА
www.dodeca.ru

ОМША
Ohmsha

Соотношение между физическими величинами в классической механике

Расстояние (длина) [м]

Время [с]

Масса [кг]

Основные единицы

$$\text{Скорость} [\text{м/с}] = \frac{\text{Расстояние} [\text{м}]}{\text{Время} [\text{с}]}$$

$$\text{Ускорение} [\text{м/с}^2] = \frac{\text{Изменение скорость} [\text{м/с}]}{\text{Время} [\text{с}]}$$

Уравнение движения

$$\begin{aligned}\text{Сила} [\text{кг·м/с}^2] &= \text{Масса} [\text{кг}] \times \text{Ускорение} [\text{м/с}^2] \\ &[\text{кг·м/с}^2] = [\text{Н}] \text{ (ньютон)}\end{aligned}$$

$$\text{Импульс} [\text{кг·м/с}] = \text{Масса} [\text{кг}] \times \text{Скорость} [\text{м/с}]$$

$$\begin{aligned}\text{Импульс силы} [\text{Н·с}] &= \text{Сила} [\text{Н}] \times \text{Время} [\text{с}] \\ &[\text{Н·с}] = [\text{кг·м/с}^2 \cdot \text{с}] = [\text{кг·м/с}]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Работа} [\text{Н·м}] &= \text{Сила} [\text{Н}] \times \text{Расстояние} [\text{м}] \\ &[\text{Н·м}] = [\text{кг·м}^2/\text{с}^2] = [\text{Дж}] \text{ (Джоуль)}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Кинетическая энергия} — [\text{кг·м}^2/\text{с}^2] &= \frac{1}{2} \times \text{Масса} [\text{кг}] \times (\text{Скорость})^2 [\text{м/с}^2] \\ &[\text{кг·м}^2/\text{с}^2] = [\text{Дж}] \text{ (Джоуль)}\end{aligned}$$

Занимательная физика

МЕХАНИКА

Манга



マンガでわかる

物理 [力学編]

新田 英雄／著
高津 ケイタ／作画
トレンド・プロ／制作



СЕРИЯ "ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА"

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

МЕХАНИКА

МАНГА

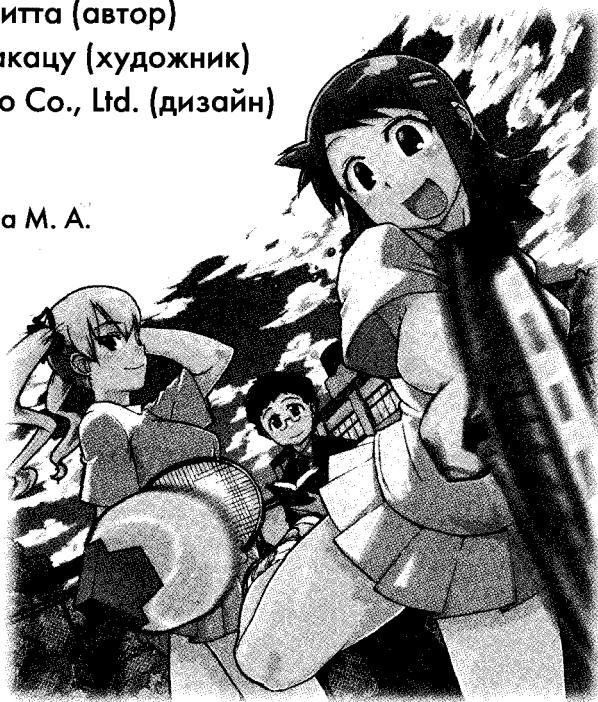
Хидео Нитта (автор)

Кейта Такацу (художник)

Trend-Pro Co., Ltd. (дизайн)

Перевод

Анненкова М. А.



ДОДЭКА

Москва
Издательский дом «Додэка-XXI»
2011

УДК 531/534

ББК 22.2я9

Н69

Нитта, Хидео.

H69 Занимательная физика. Механика. Манга / Хидео Нитта, Кейта Такацу (худож.) ; пер. Анненкова М. А. — М. : Додэка-ХХI, 2011. — 240 с. : ил. — (Серия «Образовательная манга»), — Доп. тит. л. яп. — ISBN 978-5-94120-229-4.

И. Анненков, М. А., пер.

Эту занятную книгу никак не назовёшь учебником физики, хотя в ней, как и положено добропорядочному учебнику, вводятся основные понятия классической механики. Каждая глава книги начинается комиксами, а заканчивается повторением и уточнением полученных знаний. Вместо сухих формул и примитивных примеров здесь герои книги решают свои «животрепещущие» проблемы. Симпатичный призёр олимпиады по физике Риота объясняет своей однокласснице-спортсменке и неисправимой фантазёрке Мегуми, почему ей не удаётся игра в теннис. Тогда-то и выясняется, что игра в теннис, прыжки в высоту, езда на велосипеде, — везде снуют эти «странные парни» из учебника физики — сила, импульс, энергия и др. Так ненавязчиво ты вместе с Мегуми узнаешь о повсеместном влиянии законов движения и закона всемирного тяготения Ньютона, закона сохранения импульса, закона сохранения энергии. Ты познакомишься с векторами, векторными диаграммами и их свойствами, со способами передвижения в космосе, с методами расчёта расстояний с помощью графиков, при этом ты, возможно неожиданно для себя обнаружишь, что, оказывается, умеешь вычислять интегралы.

Книга будет полезна учащимся старших классов (да и младшие школьники прочтут её с интересом), студентам вузов, а также всем, кто интересуется физикой и хочет, чтобы обучение было лёгким и увлекательным.

УДК 531/534

ББК 22.2я9

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

Original Japanese edition Manga de Wakaru Butsuri — Rikigakuhen by Hideo Nitta (Author), Keita Takatsu (Illustrator) and Trend-Pro Co., Ltd. (Producer). Published by Ohmsha, Ltd., 3-1 Kanda Nishikicho, Chiyodaku, Tokyo, Japan.

ISBN 978-5-94120-229-4 (рус.)
ISBN 978-4-27406-665-8 (яп.)

© Хидео Нитта, 2006

© Trend-Pro Co., Ltd, 2006

© Издательский дом «Додэка-ХХI», 2011

СОДЕРЖАНИЕ



Пролог	
ИГРАЯ В ТЕННИС, ДУМАЕШЬ ЛИ ТЫ О ФИЗИКЕ?	1
Глава 1	
ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ	13
1.1. Закон действия и противодействия	14
Как работает закон действия и противодействия.....	15
Равновесие	20
Равновесие сил и закон действия и противодействия....	23
Силы, действующие на расстоянии и закон действия и противодействия.....	30
1.2. Зачем нужна физика	33
Три закона Ньютона.....	33

Давайте разберёмся!	37
Скалярные и векторные величины	37
Основные свойства векторов	37
Векторы сил и равновесие.....	39
Три закона движения Ньютона.....	41
Где начинается вектор силы тяжести	42
Запись третьего закона Ньютона в виде равенства	43
Сила притяжения и всемирное тяготение	44

Глава 2 **СИЛА И ДВИЖЕНИЕ**

2.1. Скорость и ускорение.....	48
Равномерное прямолинейное движение.....	48
Ускорение.....	52
<i>Давай обсудим!</i>	
Найдём пройденное расстояние при переменной скорости ..	55
2.2. Первый и второй законы Ньютона.....	60
Закон инерции	60
Закон ускорения $F = ma$	68
<i>Давай обсудим!</i>	
Находим точное значение силы.....	75
Движение мяча, брошенного под углом к горизонту	77
Давайте разберёмся!	87
Три уравнения равноускоренного движения.....	87
Сложение векторов по правилу параллелограмма.....	88
Сложение и разложение сил.....	89

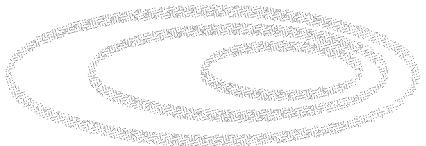
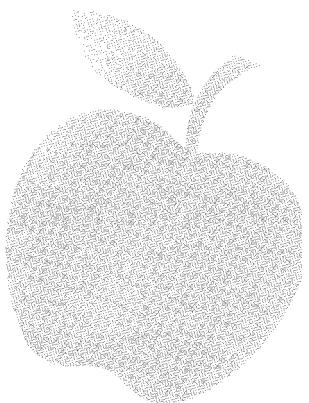
Первый закон Ньютона	91
Второй закон Ньютона	91
Направления скорости, ускорения и силы.....	92
Тело не обладает силой	93
Единица силы – Ньютон (Н)	94
Как определяются масса и сила.....	94
Определение силы тяжести.....	95
Движение мяча, брошенного под углом к горизонту	98
Найдём ускорение и скорость	100
Найдём пройденное телом расстояние	101
Глава 3	
ИМПУЛЬС	103
3.1. Импульс тела и импульс силы	104
Понятие импульса	106
<i>Давай обсудим!</i>	
Зависимость импульса от массы	109
Изменение импульса — это импульс силы.....	111
<i>Давай обсудим!</i>	
Найдём импульс при ударе	117
3.2. Импульс тела сохраняется	120
Третий закон Ньютона и сохранение импульса.....	120
<i>Давай обсудим!</i>	
Открытый космос и сохранение импульса.....	126
3.3. Импульс в повседневной жизни	129
Смягчение удара.....	129
Как усилить подачу!	133

Давайте разберёмся!	139
Импульс тела и импульс силы.....	139
Импульс тела и импульс силы в повседневной жизни.	140
Выход закона сохранения импульса	141
Разделение и соединение тел — задачи, легко решаемые с помощью закона сохранения импульса	143
Единица импульса	144
Закон действия и противодействия и закон сохранения импульса	145
Закон сохранения импульса в векторном виде.....	145
Движение ракеты	147

Глава 4 **ЭНЕРГИЯ** 151

4.1. Работа и энергия	152
Что такое энергия?	153
Давай обсудим!	
В чём разница между импульсом и кинетической энергией? ..	162
Потенциальная энергия (энергия положения)	164
Работа и потенциальная энергия	169
Давай обсудим!	
Работа и сохранение энергии	172
Работа и энергия.....	175
Давай обсудим!	
Связь между работой и кинетической энергией.....	178
Тормозной путь и скорость	180
4.2. Закон сохранения механической энергии ..	184
Превращение энергии.....	184

<i>Сохранение механической энергии</i>	187
Давай обсудим!	
<i>Закон сохранения механической энергии в действии</i> ...	191
<i>Находим скорость и высоту подброшенного мяча</i>	194
Давай обсудим!	
<i>Сохранение механической энергии на склоне</i>	195
Давайте разберёмся!	200
<i>Единицы энергии</i>	200
<i>Различие между работой по подъёму тела и работой силы тяжести</i>	201
<i>Потенциальная энергия</i>	203
<i>Скорость и высота подбрасывания</i>	204
<i>Направление силы и работа</i>	204
<i>Работа в случае переменной силы (одномерный случай)</i>	206
<i>Консервативные силы и закон сохранения энергии</i>	208
<i>Потенциальная энергия пружины и сила</i>	209
<i>Неконсервативные силы и закон сохранения энергии</i> .	209
<i>Закон сохранения энергии и задача столкновения монет</i>	210
Эпилог	
МАТЧ МЕГУМИ И САЯКИ	213
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	223



X

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для понимания физики очень важно верно «представлять» себе предмет изучения. В классической механике, в частности, нужно понимать, как применять законы физики к нестационарным, движущимся телам. Но, к сожалению, традиционные учебники редко дают пригодное описание такого движения.

Настоящая книга пытается выйти за рамки этих традиционных учебников с помощью комиксов. Комиксы — это не просто картинки, это выразительное и динамичное средство, способное отражать ход времени. Используя комиксы, можно ярко, в движении показывать все изменения. С их помощью скучные на первый взгляд законы и выдуманные ситуации превращаются в нечто знакомое, приятное и доходчивое. Ну, и само собой разумеется, комиксы — это весело, что также подчёркивается в настоящей книге.

Как автору, желающему узнать, удалось ли мой замысел, мне остаётся лишь ждать оценок читателей. К моему глубокому удовлетворению, эта работа была завершена, хотя и с исключением одной главы — из-за ограничения на количество страниц — о поездке в парк развлечений, где объяснялось вращательное движение и неинерциальная система отсчёта.

Главный персонаж этой книги — ученица средней школы Мегуми Ниномия, которая находит физику довольно сложным предметом. Я искренне желаю, чтобы моя книга достигла как можно больше читателей, которые также считают, что «физика сложна», и которым «не нравится физика», и помогла им найти в физике что-нибудь приятное, как это случилось с Мегуми. Пусть даже самую малость.

И в заключение, что не менее важно, я хотел бы выразить глубокую признательность персоналу редакции издательства Ohmsha, сценаристу *ge_akino* и иллюстратору Кейта Такатсу, чьи совместные усилия привели к появлению этого замечательного комикса, создать который мне одному было бы не под силу.

Хидео Нитта
Ноябрь 2006

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЛИЦА



Мегуми Наномия

Любит спорт, а также мечтать и подшучивать.
Подруги называют её Мегу, а Риота — уважительно Наномия-сан.

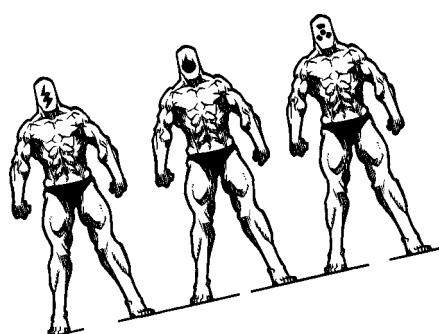
Риота Наномура

Любит физику, серебряный призёр олимпиады по физике.
Сначала Мегуми обращается к нему Наномура-кун (суффикс «кун» добавляют при обращении к мальчикам), а позже, когда они лучше узнают друг друга, — просто Риота.



Саяка Кода

Любит физику и спорт, но больше всего любит себя.



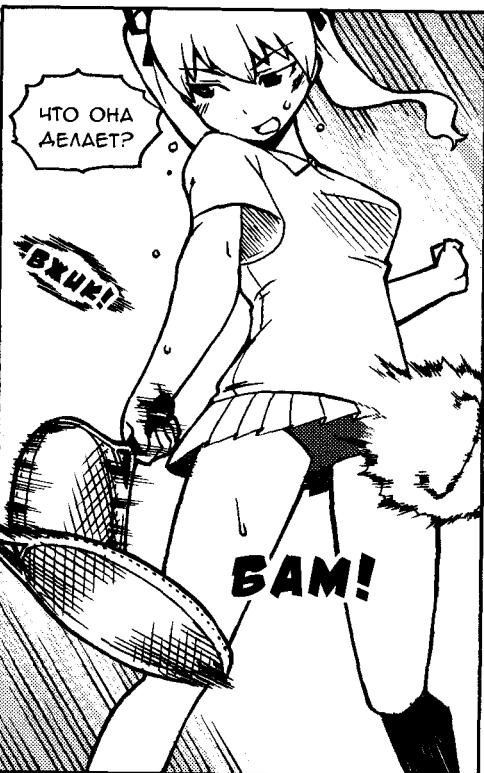
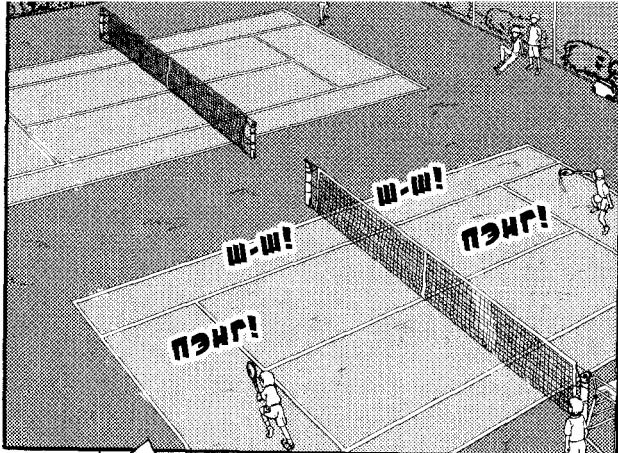
Странные парни

из учебника физики

ПРОЛОГ

**ИГРАЯ В ТЕННИС,
ДУМАЕШЬ ЛИ
ТЫ О ФИЗИКЕ?**





За несколько
часов до игры...

НУ КАК!
НА ВСЕ
ВОПРОСЫ
ОТВЕТИЛ?

Э-Э-Э...
НУ, ТОГДА

СКАЖИ, КАК
ТЫ ОТВЕТИЛ
НА ДЕВЯТЫЙ
ВОПРОС?

ДАВАЙ
СРАВНИМ
ОТВЕТЫ.

9) Предположим, Вы ударяете теннисной ракеткой по мячу. Что больше: сила, с которой мяч отталкивает ракетку, или сила, с которой ракетка отталкивает мяч?

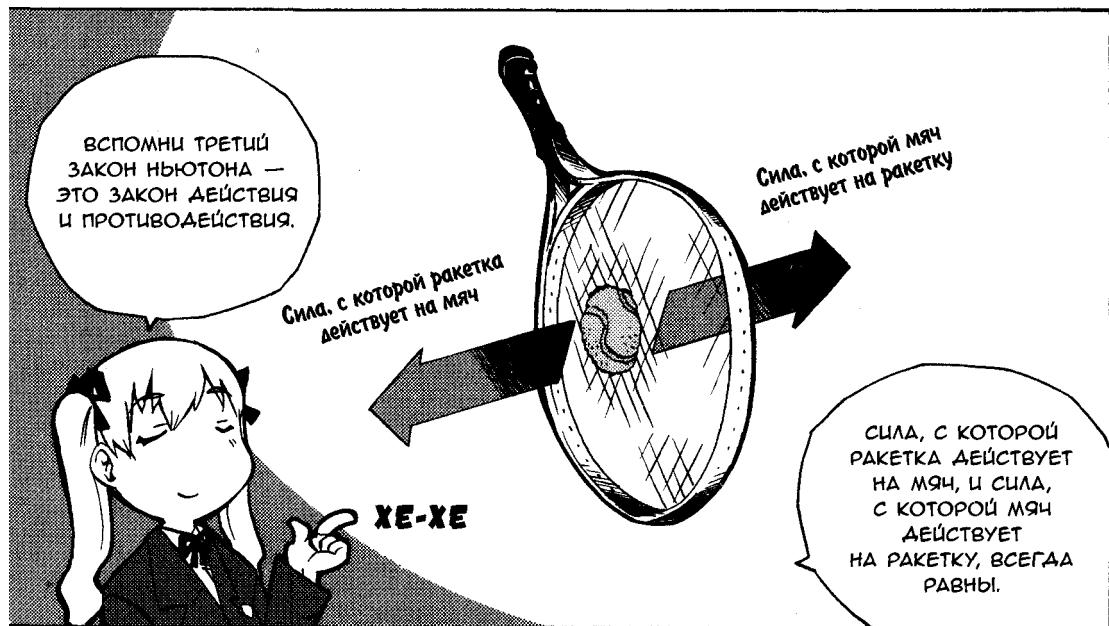
- A. Сила, с которой ракетка отталкивает мяч, больше силы, с которой мяч отталкивает ракетку.
- B. Сила, с которой мяч отталкивает ракетку, больше силы, с которой ракетка отталкивает мяч.
- C. Сила, с которой ракетка отталкивает мяч, и сила, с которой мяч отталкивает ракетку, равны.
- D. Связь между силой, с которой ракетка отталкивает мяч, и силой, с которой мяч отталкивает ракетку, зависит от массы ракетки и скорости мяча.

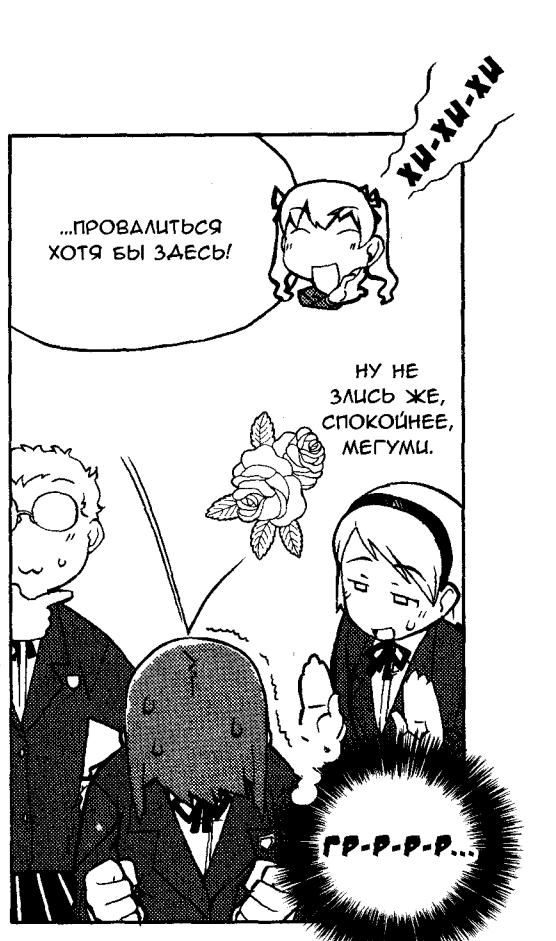
ПРАВИЛЬНЫЙ
ОТВЕТ B.

ПОЧЕМУ?

О НЕТ...
Я ВЫБЕРАЛА А.

Саяка сегодня в пре-
красном настроении





О НЕТ, НИКАК
НЕ МОГУ
СОСРЕДО-
ТОЧИТЬСЯ.

ПЭНГ!

СИЛА,
ДЕЙСТВУЮЩАЯ
НА МЯЧ,
ДОЛЖНА БЫТЬ
БОЛЬШЕ!

я...

я просто
НЕ МОГУ
выкинуть
это
из головы...

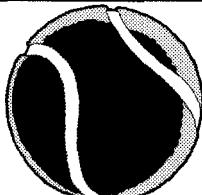
БАМ!

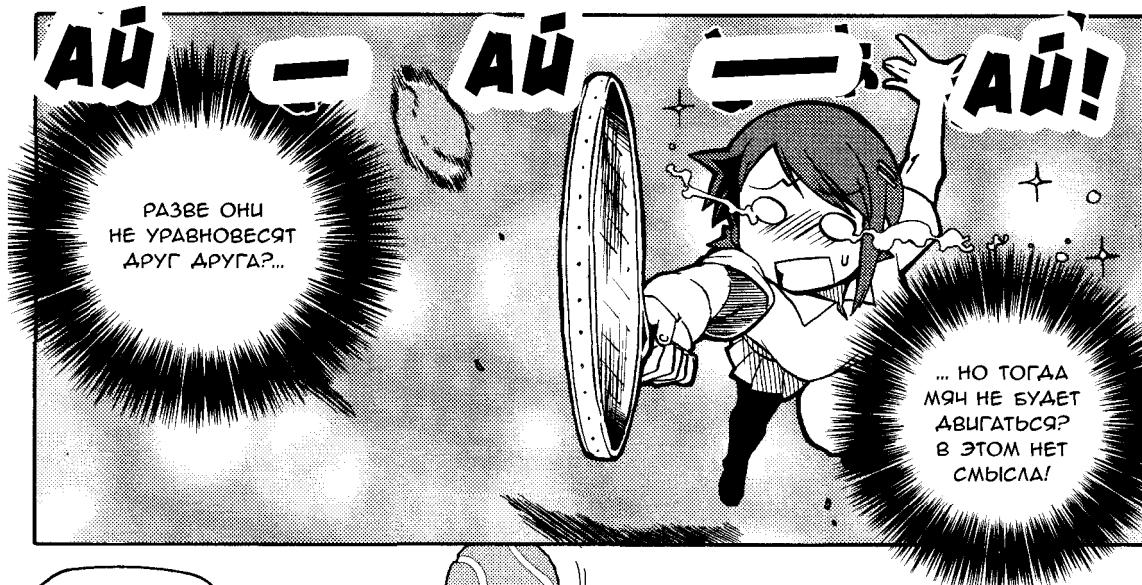
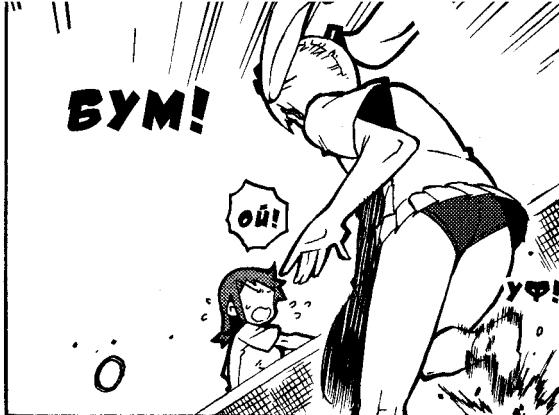
Сетка!

должна
быть...

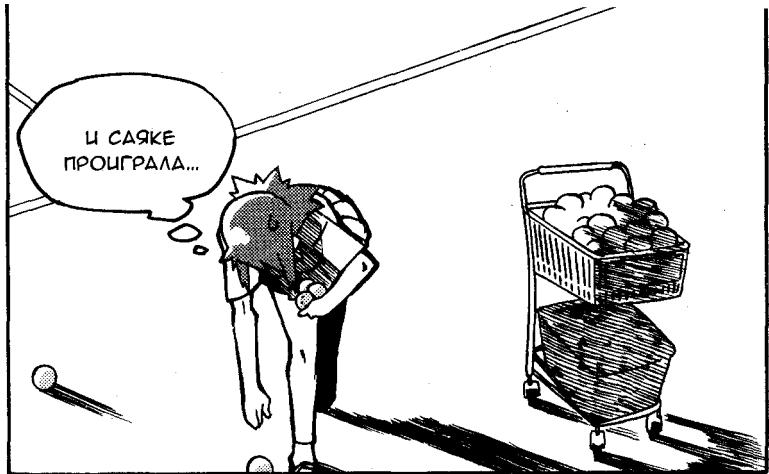
ВЖИК!

ЕСЛИ СИЛЫ,
ДЕЙСТВУЮЩИЕ
НА РАКЕТКУ
И НА МЯЧ,
РАВНЫ...





Позже этим же днем...







УХ ТЫ! ЧЕГО ЖЕ
ЕЩЁ ОЖИДАТЬ
ОТ СЕРЕБРЯНОГО
ПРИЗЁРА
ОЛИМПИАДЫ
ПО ФИЗИКЕ?



ПОМНИШЬ, СЕГОДНЯ
НА КОНТРОЛЬНОЙ
ПО ФИЗИКЕ БЫЛ
ВОПРОС
О ТЕННИСНОМ
МЯЧЕ И РАКЕТКЕ?

КОНЕЧНО.

Я ОТВЕТИЛА
НЕПРАВИЛЬНО.
И ЭТО МЕШАЛО
МНЕ ВСЮ ИГРУ.

ЭТО
ОТВЛЕКАЛО
ТЕБЯ?

ДА.

...ПОНЯТНО.

НОНОМУРА-КУН,
ПОМОЖЕШЬ МНЕ
РАЗОБРАТЬСЯ
В ФИЗИКЕ?

Я СОВСЕМ
НЕ МОГЛА СО-
СРЕДОТОЧИТЬ-
СЯ НА ИГРЕ.

МОГУ
Я ПОПРО-
СИТЬ?

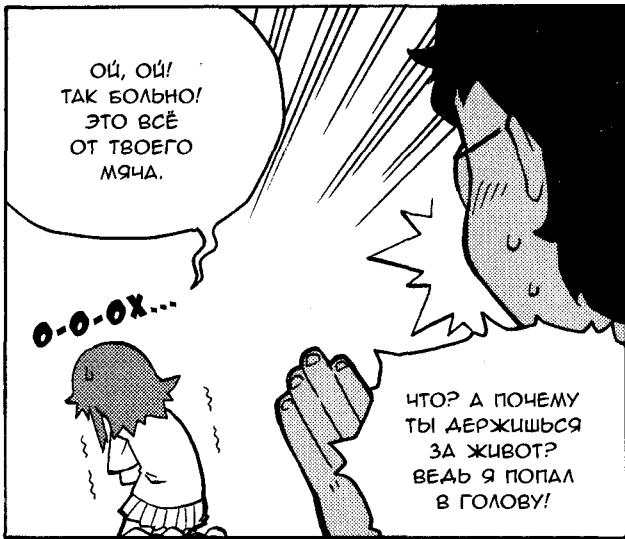
ХЛ-ОП!

ПОЧЕМУ Я?!

ДР-Р

ДР-Р

У ТЕБЯ ЖЕ
СЕРЕБРЯНАЯ
МЕДАЛЬ. РАЗВЕ НЕТ
ПОЖАЛУЙСТА,
ПОМОГИ МНЕ!

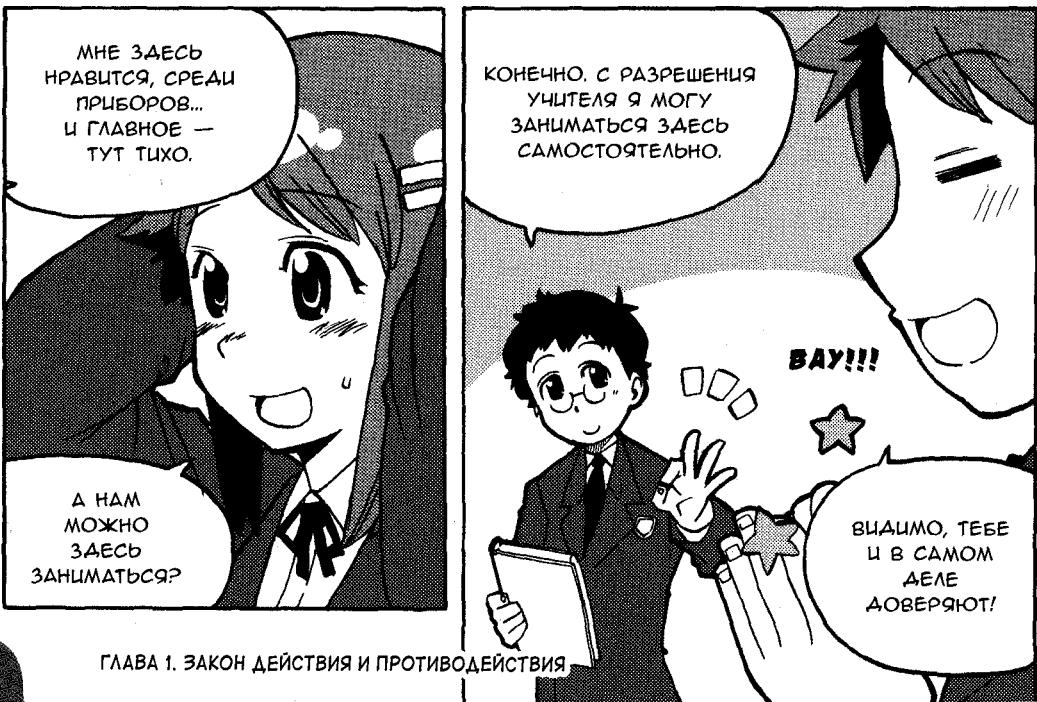


1

ЗАКОН
ДЕЙСТВИЯ
И ПРОТИВДЕЙСТВИЯ



1.1. ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ





КАК РАБОТАЕТ ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

ПОЖАЛУЙ, НАЧНЁМ.







А ТЕПЕРЬ
ПОПРОБУЕМ-КА
НАОБОРОТ.

ЕСЛИ ТОЛКАТЬ БУДУ
Я, МЫ СНОВА
РАЗЪЕАЕМСЯ ТОЧНО
ТАК ЖЕ.

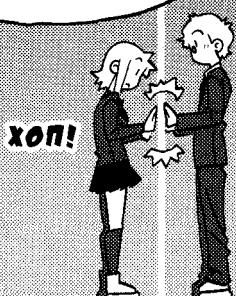
ПРАВДА?

КОГДА
ТЫ ТОЛКАЕШЬ МЕНЯ,
ТО ЕСТЬ
ПРИКЛАДЫВАЕШЬ
КО МНЕ СИЛУ,

ДАЖЕ ЕСЛИ
Я НЕ СОБИРАЮСЬ
ТОЛКАТЬ ТЕБЯ
В ОТВЕТ,

К ТВОЕМУ ТЕЛУ
Тоже будет
приложена сила,
Ниномия-сан.

ВСЯКИЙ РАЗ, КОГДА
КТО-ТО ИЗ НАС
КАКИМ-ЛИБО ОБРАЗОМ
ПРИКЛАДЫВАЕТ СИЛУ
К ДРУГОМУ,



НА НЕГО ДЕЙСТВУЕТ
ТАКАЯ ЖЕ СИЛА,
ТОЛЬКО В ОБРАТНОМ
НАПРАВЛЕНИИ.



ТАК ЧТО
В ЛЮБОМ СЛУЧАЕ
Я НЕ МОГУ
САВИНУТЬ ТЕБЯ,
А САМ ОСТАТЬСЯ
НА МЕСТЕ.

КРОМЕ ТОГО,
ЭТИ СИЛЫ
ВСЕГДА ОДИНАКОВЫ
ДЛЯ ОБЕИХ СТОРОН.

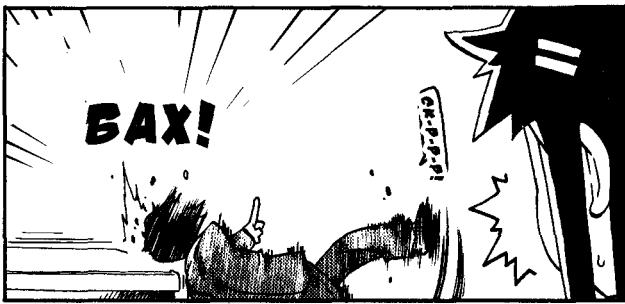
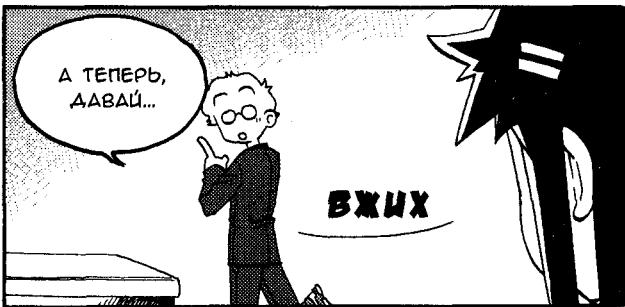
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
ЗАКОНОМ ДЕЙСТВИЯ
И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ,
КОТОРЫЙ ТАКЖЕ
ОБЪЯСНЯЕТ, ПОЧЕМУ
СИЛЫ ВСЕГДА
ВОЗНИКАЮТ МЕЖДУ
ДВУМЯ ТЕЛАМИ.



Я ЭТОГО
НЕ ЗНАЛА.

ХМ...





ДЕЛО В ТОМ, ЧТО,
КОГДА ТЕЛА НЕ-
ПОДВИЖНЫ, ЗАКОН
ДЕЙСТВИЯ И ПРО-
ТИВДЕЙСТВИЯ
ЛЕГКО СПУТАТЬ...

...С РАВНОВЕСИЕМ
СИЛ.

РАВНОВЕСИЕМ... СИЛ?

РАССМОТРИМ СИЛЫ,
ДЕЙСТВУЮЩИЕ
НА МЯЧ У МЕНЯ
В РУКЕ.

КРОМЕ ЧИСЛЕННОГО
ЗНАЧЕНИЯ У СИЛЫ
ЕСТЬ НАПРАВЛЕНИЕ.

ВЕЛИЧИНА,
ОБЛАДАЮЩАЯ
И ЧИСЛЕННЫМ ЗНАЧЕНИЕМ,
И НАПРАВЛЕНИЕМ, НАЗЫ-
ВАЕТСЯ ВЕКТОРНОЙ,
А НА СХЕМЕ ОБОЗНА-
ЧАЕТСЯ СРЕДКОЙ.

Направление силы



ЭТИ ВОТ СРЕДКОИ
НА СХЕМЕ И ЕСТЬ
ВЕКТОРЫ? ДА?



НУЖНО НАРИСОВАТЬ СТРЕЛКУ, УКАЗЫВАЮЩУЮ НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ, С ДЛИНОЙ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ЗНАЧЕНИЮ ЭТОЙ СИЛЫ.

ТО ЕСТЬ ЧЕРТЕЖ ПОКАЗЫВАЕТ...



ДА, РАВНОВЕСИЕ – ЭТО СВЯЗЬ МЕЖДУ СИЛАМИ, ЧТО ТЫ И МОЖЕШЬ ВИДЕТЬ НА ЧЕРТЕЖЕ.

Сумма сил, действующих на мяч

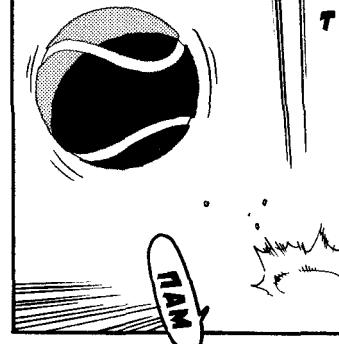
$$\text{Сила тяжести} + \text{Сила действия руки} = \text{Ноль}$$

СИЛЫ УРАВНОВЕШИВАЮТ ДРУГ ДРУГА.

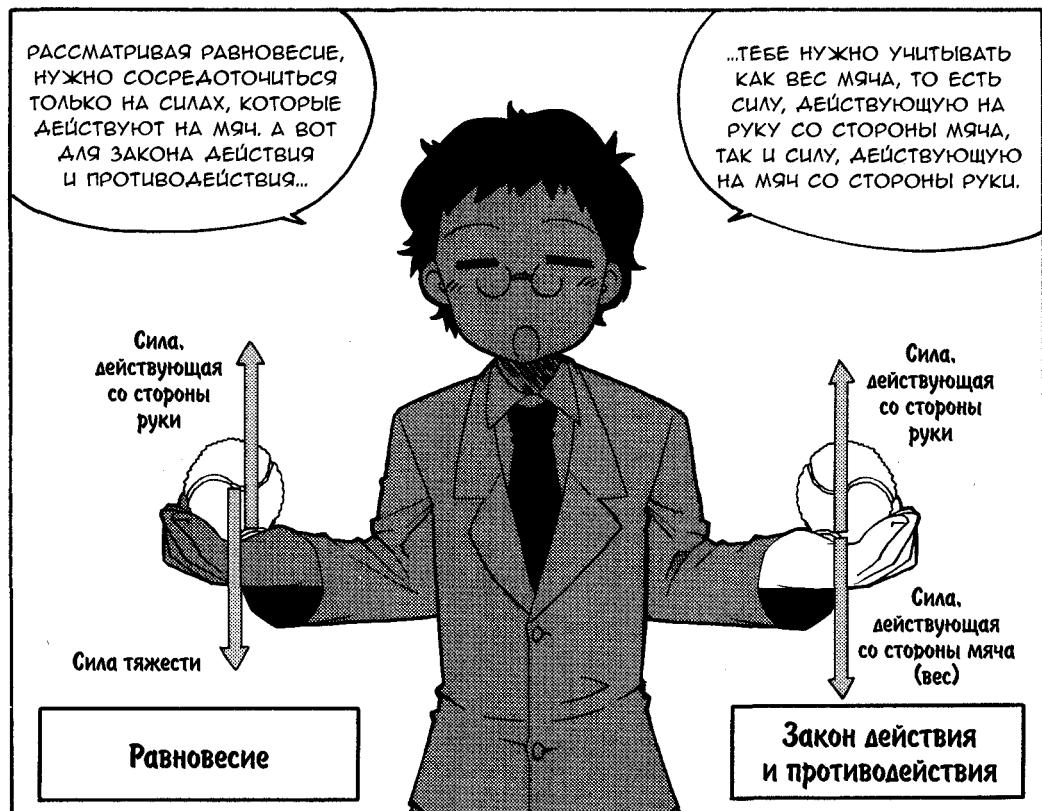
ОДНАКО СТОИТ МНЕ БЫСТРО УБРАТЬ ИЗ-ПОД МЯЧА РУКУ...



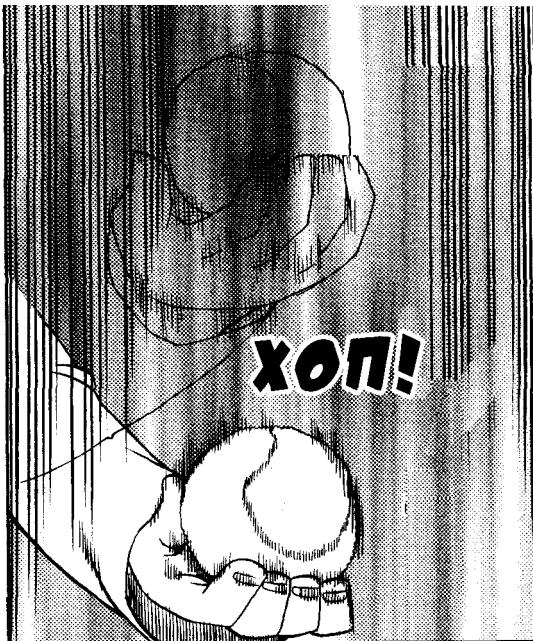
...КАК СИЛА ТЯЖЕСТИ СТАНЕТ ЕДИНСТВЕННОЙ СИЛОЙ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА МЯЧ, И ОН УПАДЁТ.



РАВНОВЕСИЕ СИЛ И ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ







Стационарное состояние
(силы уравновешены)

...ДВИЖЕНИЕ РУКИ ВНИЗ ПРИВОДИТ К...

Когда рука опускается...



...РЕЗКОМУ УМЕНЬШЕНИЮ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА МЯЧ СО СТОРОНЫ РУКИ.



Я... ПРАВА?

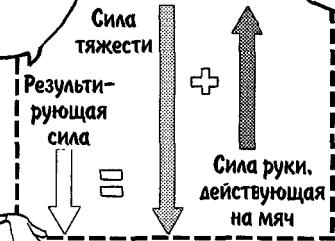
УРА!

ДЕСОЛЮТНО!
В ЯБЛОЧКО!

КОГДА СИЛА,
ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА МЯЧ
СО СТОРОНЫ РУКИ, СТАНО-
ВИТСЯ МЕНЬШЕ, РАВНОВЕ-
СИЕ СИЛ НАРУШАЕТСЯ, ТАК
КАК СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ
ВНИЗ, ОКАЗЫВАЕТСЯ
БОЛЬШЕ.

С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РАВНО-
ВЕСИЯ ПАДЕНИЕ МЯЧА
МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ ТАК.

ВНИЗ,
СЭР.



Сила руки,
действующая
на мяч

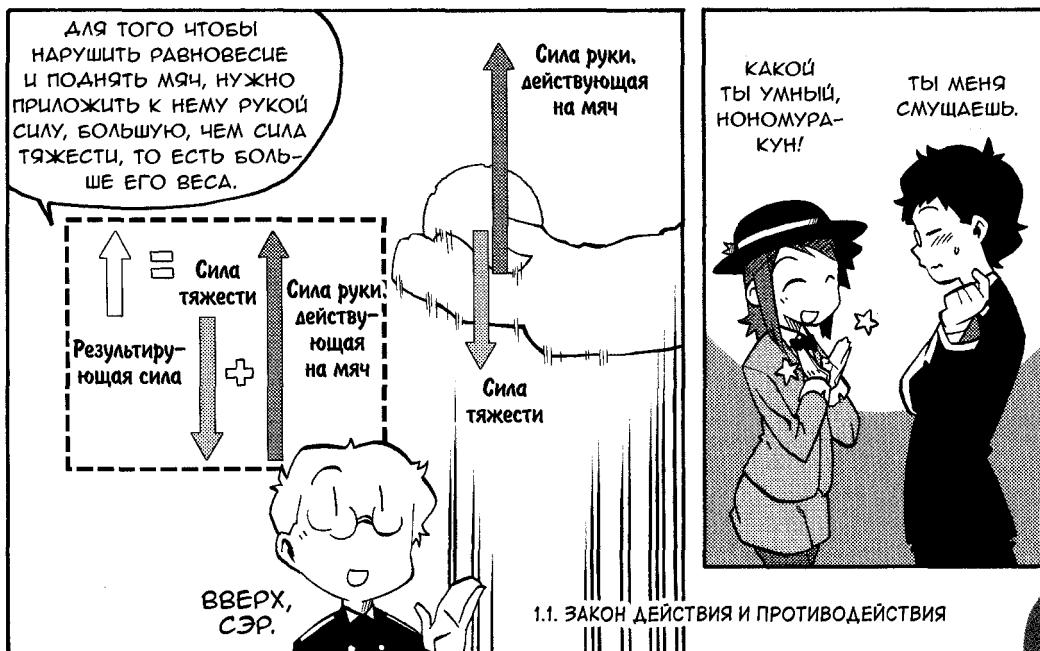
ПОЭТОМУ МЯЧ
БОЛЬШЕ
НЕ НАХОДИТСЯ
В РАВНОВЕСИИ.

А КАК ЭТО БУДЕТ
ВЫГЛЯДЕТЬ С ПОЗИЦИИ
ЗАКОНА ДЕЙСТВИЯ
И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ?

ТЕПЕРЬ МЫ
ДОЛЖНЫ
УЧИТЫВАТЬ
НЕ ТОЛЬКО МЯЧ,
НО И РУКУ.

ДАВАЙ ПОДУМАЕМ.
КОГДА
ТЫ ОПУСКАЕШЬ РУКУ,
КАК ТЫ ОЩУЩАЕШЬ
ВЕС МЯЧА?





И ТОГДА ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА ТОЖЕ СТАНОВИТСЯ БОЛЬШЕ. ВОТ ПОЧЕМУ МЯЧ КАЖЕТСЯ ТЕБЕ ТЯЖЕЛЕЕ.



ВЕДЬ СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА РУКУ СО СТОРОНЫ МЯЧА, УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ТАК ЖЕ, КАК И СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА МЯЧ СО СТОРОНЫ РУКИ.

ТЕПЕРЬ ТЫ, НАВЕРНОЕ, УЖЕ МОЖЕШЬ ПРАВИЛЬНО ОТВЕТИТЬ НА ВОПРОС О РАКЕТКЕ И МЯЧЕ?



НЕ МОЖЕШЬ ОТВЕТИТЬ НА ТАКОЙ, ПРОСТОЙ ВОПРОС?

НЕ ТВОЁ ДЕЛО!

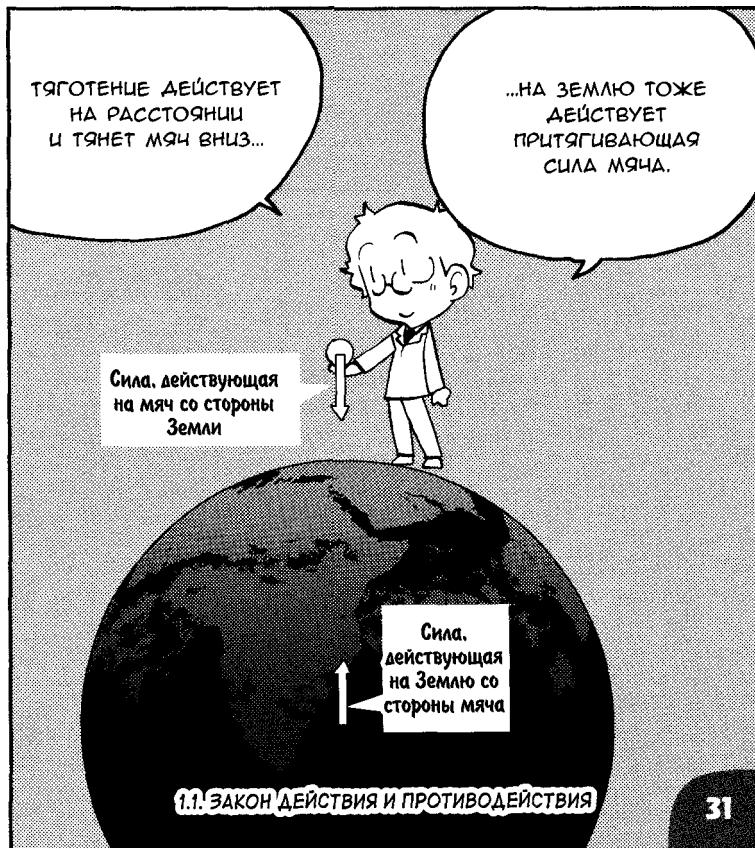
ЧТО С ТОБОЙ, НИНОМИЯ-САН?

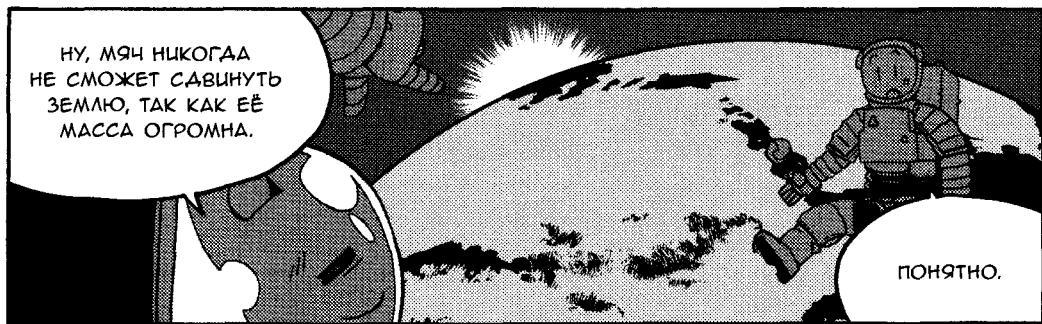
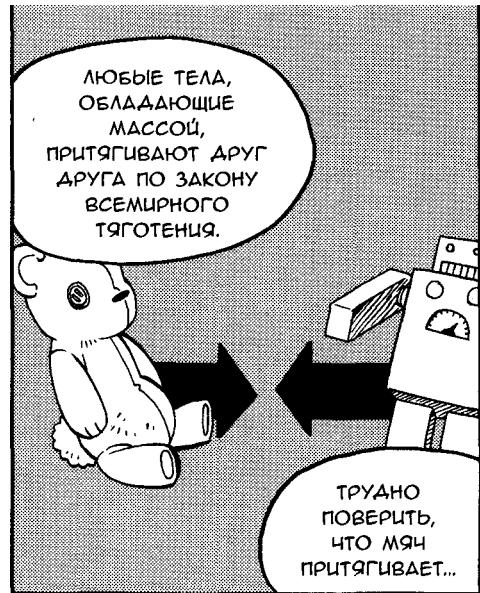
9) Предположим, Вы ударяете теннисной ракеткой по мячу. Что больше: сила, с которой мяч отталкивает ракетку, или сила, с которой ракетка отталкивает мяч?

Гм! Прости.
Кажется,
вопрос звучал
примерно так.



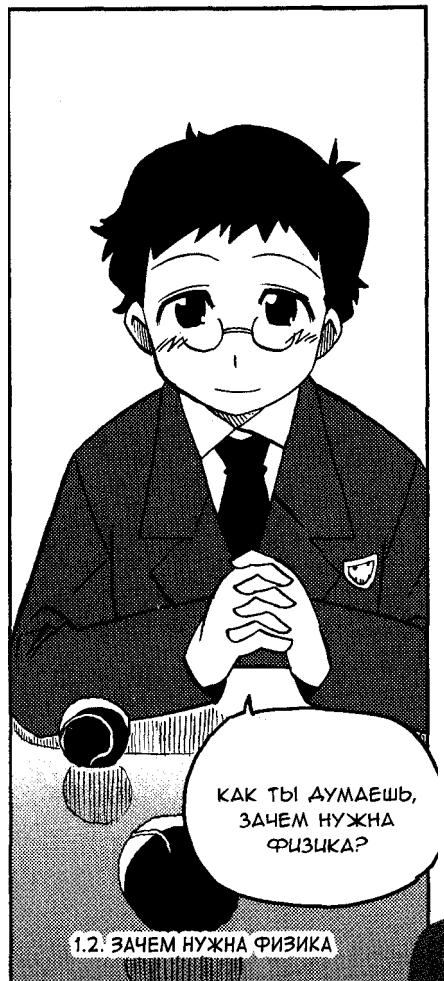
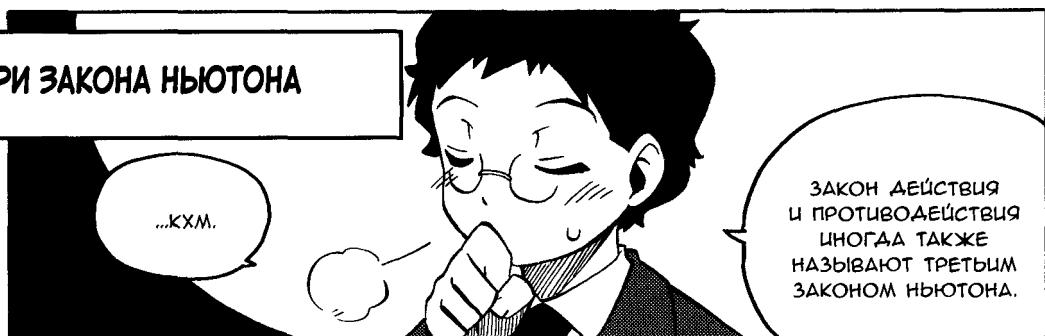


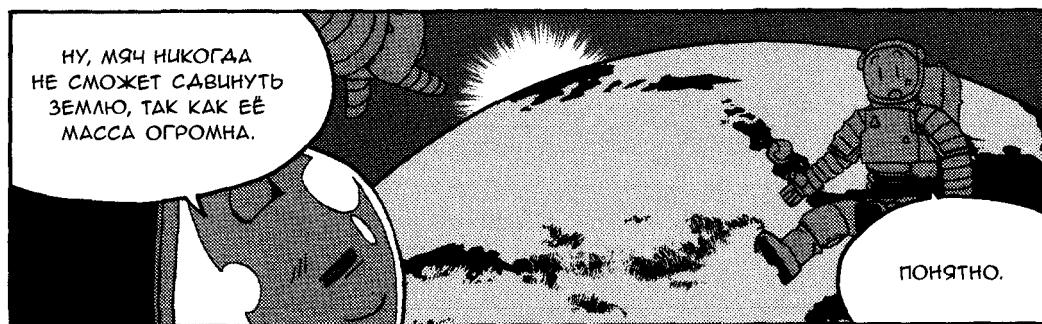
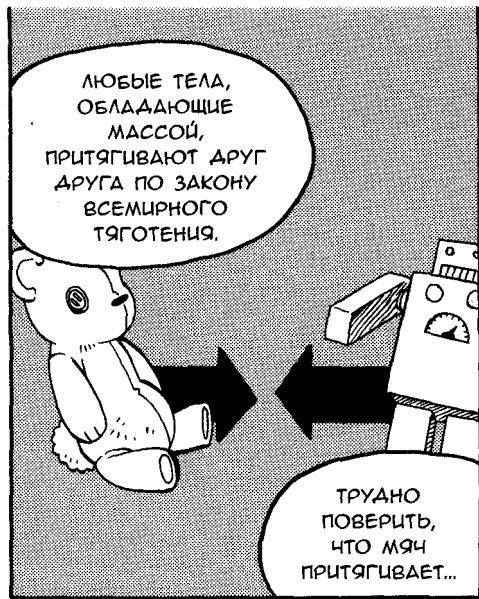
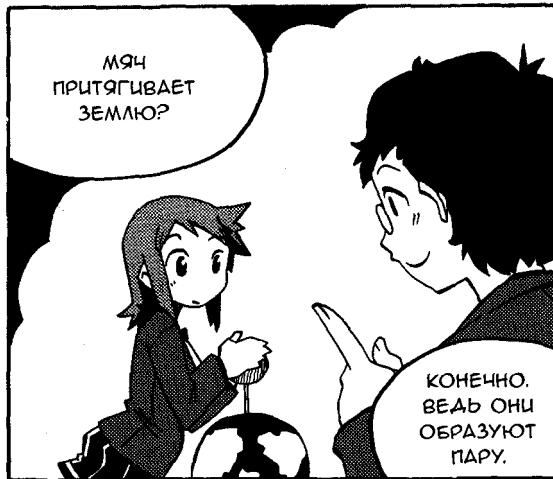




1.2. ЗАЧЕМ НУЖНА ФИЗИКА

● ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА





1.2. ЗАЧЕМ НУЖНА ФИЗИКА

ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА

...КХМ.

ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ
И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ
ИНОГДА ТАКЖЕ
НАЗЫВАЮТ ТРЕТЬИМ
ЗАКОНОМ НЬЮТОНА.

ТЫ ГОВОРИШЬ
ТРЕТЬИМ. ХОЧЕШЬ
СКАЗАТЬ, ЕСТЬ ЕЩЁ
ПЕРВЫЙ, ВТОРОЙ,
ЧЕТВЁРТЫЙ?..

ИХ ВСЕГО ТРИ.
И ОНИ НАЗЫВАЮТСЯ
ТРИ ЗАКОНА
МЕХАНИКИ НЬЮТОНА.

ДО ТОГО КАК МЫ
К НИМ ПЕРЕЙДЁМ...
МОГУ Я КОЕ-ЧТО
У ТЕБЯ СПРОСИТЬ,
НИКОМИЯ-САН?

ЧТО?

КАК ТЫ ДУМАЕШЬ,
ЗАЧЕМ НУЖНА
ФИЗИКА?

ЧТОБЫ ЗАУЧИВАТЬ
КУЧУ УРАВНЕНИЙ
ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ.
ТАК Я ДУМАЛА
РАНЬШЕ.

МММ...

МОЖЕТ БЫТЬ,
ЭТО НАУКА,
ОБЪЯСНЯЮЩАЯ
МЕХАНИКУ ДВИЖЕНИЯ?

ХОРОШО
СКАЗАНО!

НО ПОСЛЕ ТВОИХ
ОБЪЯСНЕНИЙ,
НОНОМУРА-КУН,
МОЁ МНЕНИЕ,
КАЖЕТСЯ,
ИЗМЕНИЛОСЬ.

КРУГЛЫ

КРУГЛЫ

ФИЗИКА — ЭТО
СОВСЕМ НЕ ТОТ
ПРЕДМЕТ, КОТОРЫЙ
НАДО ЗАЗУБРИВАТЬ.

Я ДУМАЮ, ЧТО ЭТО
НАУКА, КОТОРАЯ
ПЫТАЕТСЯ...

...ОБЪЯСНИТЬ
ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНОВ
ИЛИ РАССЧИТАТЬ ИХ
С ПОМОЩЬЮ
МАТЕМАТИКИ.

УХ ТЫ!
ЗВУЧИТ
ДОВОЛЬНО
УБЕДИТЕЛЬНО.

А ОСНОВА ФИЗИКИ —
КЛАССИЧЕСКАЯ
МЕХАНИКА, КОТОРУЮ
МЫ СЕЙЧАС
И ИЗУЧАЕМ.

ЦЕЛЬ МЕХАНИКИ КАК НАУКИ — ПРЕДСКАЗАТЬ АВИЖЕНИЕ ТЕЛА. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, БЕЗОШБОЧНО ОПРЕДЕЛЯТЬ, КОГДА И ГДЕ БУДЕТ НАХОДИТЬСЯ ЭТО ТЕЛО.

ВОТ ЗДОРОВО!
А Я РАНЬШЕ
ОВ ЭТОМ
НЕ ДУМАЛА.

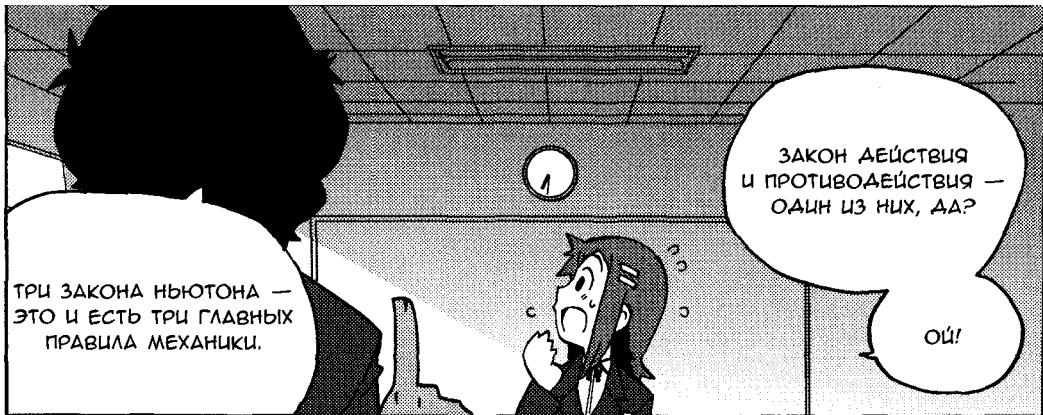
СОГЛАСИСЬ, ЛЕГКО СНЯТЬ АВИЖУЩИЙСЯ МЯЧ НА ПЛЕНКУ И ПОСМОТРЕТЬ, ГДЕ ОН БЫЛ В ОПРЕДЕЛЁННЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ.

ПОЛАГАЮ,
ДА...

А ТЕПЕРЬ ПРЕДСТАВЬ, ЧТО ТЕБЕ НУЖНО ПРЕДСКАЗАТЬ, ГДЕ БУДЕТ МЯЧ ЧЕРЕЗ СЕКУНДУ ПОСЛЕ ТОГО, КАК ТЫ ЕГО БРОСИШЬ.

ПОНИМАЮ.

ДЛЯ ЭТОГО ТЕБЕ НАДО ЗНАТЬ ПРАВИЛА, ПО КОТОРЫМ ОН АВИЖЕТСЯ.





ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!



СКАЛЯРНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

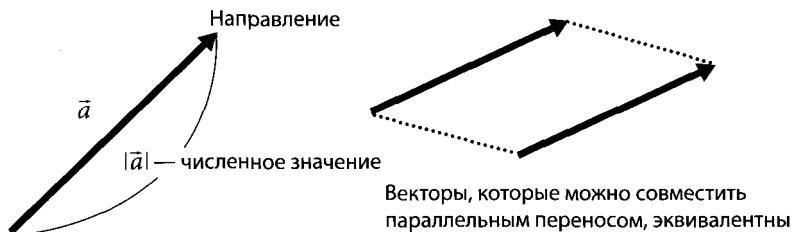
Физика в целом, и механика в частности, изучают свойства различных объектов и механизмы их взаимодействия. Такие свойства, как масса, сила, скорость и другие, называются физическими величинами, которые могут быть охарактеризованы либо только численным значением, либо численным значением и направлением. Первые из них называются *скалярными*, вторые — *векторными*. Например, масса — скалярная величина (скаляр); скалярами являются также энергия и работа, с которыми мы познакомимся в Главе 4.

Скорость, ускорение (речь о которых пойдёт в Главе 2), сила и импульс (Глава 3) — это векторные величины (векторы), так как кроме численного значения они обладают направлением. Можно забыть термины *скаляр* и *вектор*, но надо помнить, что в физике есть два типа величин: обладающие только численным значением и обладающие как значением, так и направлением.



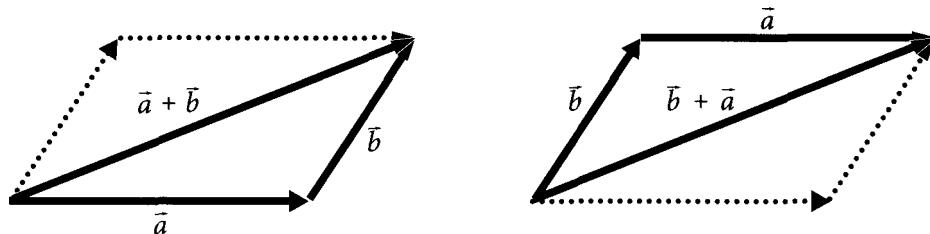
ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВЕКТОРОВ

Графически вектор изображается стрелкой. Длина стрелки соответствует численному значению вектора и называется модулем, или абсолютной величиной вектора, а конец стрелки указывает его направление. Два вектора эквивалентны друг другу, если их можно полностью совместить путём параллельного переноса.



Обрати внимание, что если вектор обозначается a или \bar{a} , то его численное значение — это $|a|$ или a .

СЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ



Сумму двух векторов ($\vec{a} + \vec{b}$) можно получить, если соединить конец вектора \vec{a} с началом вектора \vec{b} , а затем провести прямую линию из начала вектора \vec{a} в конец вектора \vec{b} , как показано на рисунке слева.

Так как этот вектор является диагональю параллелограмма, изображённого на рисунке, то очевидно, что он эквивалентен вектору $\vec{b} + \vec{a}$. Следовательно, справедливо следующее утверждение:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}.$$

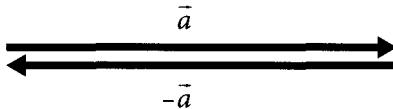
ЗАКОН КОММУТАТИВНОСТИ (переместительный закон)

Порядок, в котором ты складываешь векторы, не имеет значения! Сумму трёх и более векторов можно найти, проделав вышеизложенную процедуру соответствующее число раз.

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ВЕКТОРЫ

Вектор $-\vec{a}$, или \vec{a} со знаком минус, в сумме с вектором \vec{a} даёт ноль. Это равенство выглядит так:

$$\vec{a} + (-\vec{a}) = 0.$$



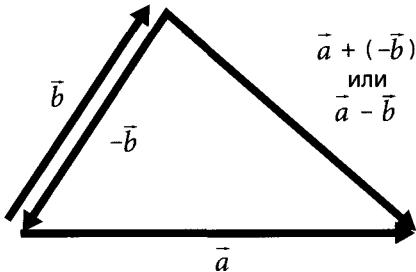
На языке геометрии $-\vec{a}$ — это всего лишь вектор, длина которого совпадает с длиной a , а направление строго противоположно. Ноль в правой части равенства также представляет собой вектор, который называют нулевым вектором.

ВЫЧИТАНИЕ ВЕКТОРОВ

Разность двух векторов ($\vec{a} - \vec{b}$) можно представить следующим образом:

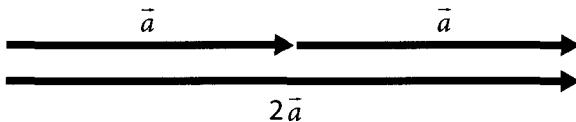
$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

Так что результат вычитания можно найти, воспользовавшись той же процедурой, что и при сложении векторов.



УМНОЖЕНИЕ ВЕКТОРА НА СКАЛЯР

Удваивание вектора \vec{a} означает увеличение его длины вдвое без изменения направления. Результат записывается как $2\vec{a}$.



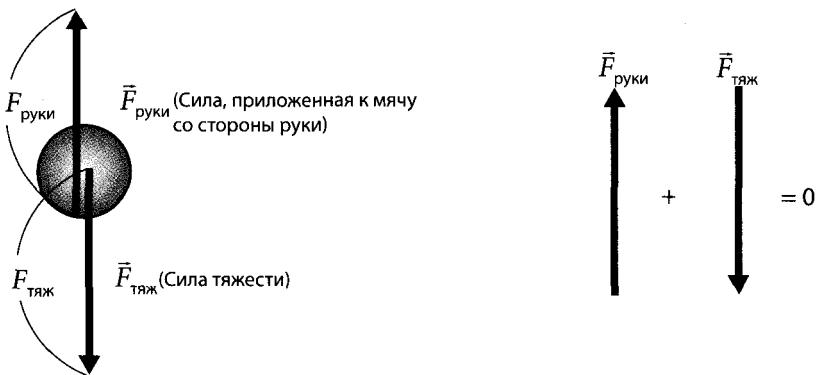
В общем случае умножение вектора \vec{a} на некое число k ($k\vec{a}$) даёт вектор, длина которого в k раз больше длины \vec{a} , а направление сохраняется.

❸ ВЕКТОРЫ СИЛ И РАВНОВЕСИЕ

Рассматривая силы, действующие на теннисный мяч (стр. 22), мы пришли к следующему выражению:

$$\begin{array}{lcl} \text{результатирующая сила,} & = & \text{сила} \\ \text{действующая на мяч} & & \text{тяжести} \\ & & + \text{сила, действующая} \\ & & \text{со стороны руки} \end{array} = 0.$$

Думаешь, знак «+» — это ошибка, и на его месте должен быть знак «−»? Нет, это не так! Не забывай, что силы — это векторы, поэтому данное равенство верно. Поскольку ты имеешь дело с векторами, то результатирующая сила, действующая на тело, должна равняться именно сумме всех сил.



Рассмотрим баланс сил, действующих на мяч. Обозначим силу, действующую нам яч с сопротивления руки, $\vec{F}_{\text{руки}}$, а силу тяжести — $\vec{F}_{\text{твяж}}$. Результирующая сила ($\vec{F}_{\text{рез}}$), действующая на мяч, равна:

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_{\text{руки}} + \vec{F}_{\text{твяж}}.$$

Результирующую силу также называют *равнодействующей силой*. Если силы, действующие на мяч, уравновешены, то результирующая сила равна нулю.

$$\vec{F}_{\text{рез}} = 0, \text{ или, что то же самое, } \vec{F}_{\text{руки}} + \vec{F}_{\text{твяж}} = 0.$$

Другими словами, $\vec{F}_{\text{руки}}$ и $\vec{F}_{\text{твяж}}$ — это два вектора с одинаковыми длинами и противоположными направлениями, в сумме дающие ноль.

$$\text{Сила, приложенная к мячу со стороны руки} + \text{сила тяжести мяча} = 0.$$

А теперь перейдём к рассмотрению сил с точки зрения только их значений, а не векторов, обладающих ещё и направлением. Как было показано на стр. 38, численное значение силы выражается с помощью знака модуля, т. е. $|\vec{F}_{\text{руки}}|$ и $|\vec{F}_{\text{твяж}}|$. Справедлива также другая форма записи: $|\vec{F}_{\text{руки}}| = F_{\text{руки}}$ и $|\vec{F}_{\text{твяж}}| = F_{\text{твяж}}$. Мы знаем, что равенство значений этих двух сил можно записать так:

$$F_{\text{руки}} = F_{\text{твяж}}, \text{ или } F_{\text{руки}} - F_{\text{твяж}} = 0.$$

Обрати внимание, что здесь силы изображены без стрелок. Это означает, что имеются в виду только их численные значения. Записывая равенства для уравновешенных сил, мы должны чётко разделять случаи, когда речь идёт о силах как векторах, и случаи, когда речь идёт только об их значениях без учёта направлений (т. е. о скалярах).

® ТРИ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ НЬЮТОНА

Исаак Ньютон — английский физик, родившийся в 1643 году. На основе своих наблюдений за движением различных тел он сформулировал следующие законы:

Первый закон (закон инерции): Тело остаётся в состоянии покоя, если равнодействующая приложенных к телу сил равна нулю. Тело, движущееся равномерно и прямолинейно, продолжает равномерное и прямолинейное движение, если равнодействующая приложенных к телу сил равна нулю.

Второй закон (закон ускорения): Равнодействующая сила, приложенная к члену, равна массе этого тела, умноженной на его ускорение.

Третий закон (закон действия и противодействия): Взаимодействия двух тел друг на друга равны по величине и направлены в противоположные стороны.

Вернёмся к примеру с мячом в руке, использованному в этой главе. (О нём мы продолжим разговор и в Главе 2.)

На основе первого закона мы можем сказать, что результирующая сила, действующая на неподвижное тело, равна нулю. Так как мяч находится в равновесии, то он неподвижен и остается неподвижным; так работает первый закон движения. Мяч не движется, а значит, сумма силы, действующей со стороны руки, и силы тяжести должна давать нулевую результирующую силу.

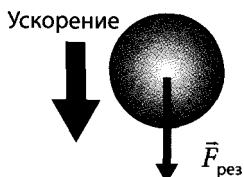
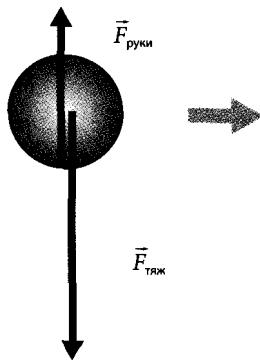
Как мы узнали из этой главы, закон действия и противодействия — это третий закон движения. Этот закон говорит нам о том, что сила, с которой рука действует на мяч, и сила, с которой мяч действует на руку, равны по величине и противоположны по направлению. Закон действия и противодействия работает всегда, даже когда ты поднимаешь или опускаешь мяч рукой.

Второй закон движения гласит, что тело, к которому приложена сила, двигается с ускорением. Если резко опустить руку с мячом, то сила, с которой рука действует на него ($F_{\text{руки}}$), уменьшится, а сила тяжести ($F_{\text{тяж}}$) останется прежней.

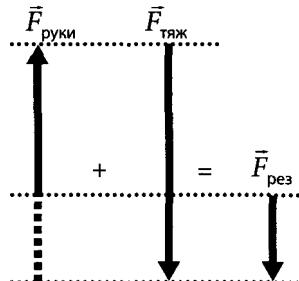
Следовательно, равновесие сил нарушится, и сумма $F_{\text{тяж}}$ и $F_{\text{руки}}$ примет ненулевое значение, пока движется мяч. В скалярной форме получим

$$F_{\text{рез}} = F_{\text{тяж}} - F_{\text{руки}} > 0$$

Это равенство описывает абсолютную величину силы, направленной вниз. Теперь, на основе второго закона движения, который утверждает, что тело, на которое действует результирующая сила, приобретает ускорение, пропорциональное этой силе, мяч должен начать ускоряться, т. е. прийти в движение. Таким образом механика объясняет движение мяча, вызванное резким опусканием руки, которая его удерживает. Аналогично объясняется и движение мяча вверх.



Если резко опустить руку, равновесие нарушается, и мяч начинает двигаться вниз с ускорением.



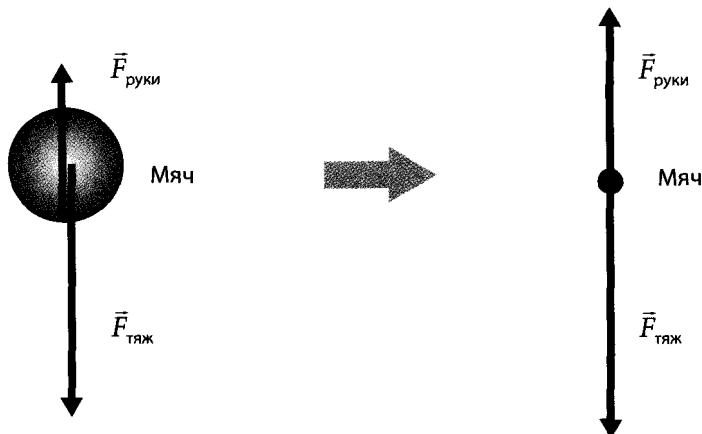
Но нужно понимать одно обстоятельство. Если мяч движется вверх или вниз с постоянной скоростью, то имей в виду, что равнодействующая (результатирующая) сила, приложенная к нему, остаётся нулевой, так как силы уравновешивают друг друга, и он не ускоряется. Об этом говорит первый закон движения. Ненулевая равнодействующая сила приложена к мячу только тогда, когда скорость его движения изменяется, т. е. он ускоряется. Когда же он движется с постоянной скоростью, ускорение равно нулю, как и равнодействующая сила. Другими словами, приложенные к нему силы уравновешены, хотя мяч и движется.

Чтобы тело, находящееся в покое, начало двигаться, к нему нужно приложить силу. Начало движения означает, что тело переходит из состояния с нулевой скоростью в состояние с некой конечной скоростью. Когда происходит этот переход, то говорят, что тело ускорилось.

⌚ ГДЕ НАЧИНАЕТСЯ ВЕКТОР СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

На рисунке в предыдущем параграфе векторы сил, приложенных к мячу, $\vec{F}_{руки}$ и $\vec{F}_{тяж}$, имеют разные начальные точки. Когда ты рисуешь вектор, соответствующий силе, с которой рука действует на мяч, ты начинаешь его в том месте, где рука и мяч соприкасаются друг с другом. Это вполне логично. Но почему начальная точка для силы тяжести находится в центре мяча?

В элементарной физике тело рассматривается как точечная масса, не обладающая объёмом; поэтому неважно, где начинать вектор. Мы же изображаем эту материальную точку как тело, имеющее определённый объём только для наглядности рисунков и чертежей.



Возьмём объёмное тело и посмотрим, как мы можем изобразить приложенные к нему силы. В случае с мячом сила тяжести приложена к центру масс мяча (также называемому *центром тяжести*). На схеме вверху ты видишь, что вектор силы действует именно в этой точке. Однако сила руки, направленная вверх, действует на поверхность мяча в точке их соприкосновения. Поэтому начало вектора этой силы на схеме мы поместим туда.

Теперь, чтобы упростить вычисления, мы представим тело как массу без объема, или как точечную массу. Мы будем делать это со всеми объемными телами, так как в противном случае вычисления могут сильно усложниться. Соответствующую упрощенную схему можно увидеть на рисунке справа. Запомни, что все примеры в этой книге мы будем упрощать подобным образом, даже если их схемы будут казаться тебе более сложными.

ЗАПИСЬ ТРЕТЬЕГО ЗАКОНА НЬЮТОНА В ВИДЕ РАВЕНСТВА

Для выражения закона действия и противодействия словами нам понадобится длинная фраза, например такая: «Когда одно тело взаимодействует с другим телом, на оба тела действуют силы, одинаковые по величине, но противоположные по направлению». Так давайте лучше попробуем записать этот закон в виде простого равенства. Когда тело А действует на тело В с силой $\vec{F}_{A \rightarrow B}$, а тело В действует на тело А с силой $\vec{F}_{B \rightarrow A}$, закон действия и противодействия записывается так:

$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}. \quad (1)$$

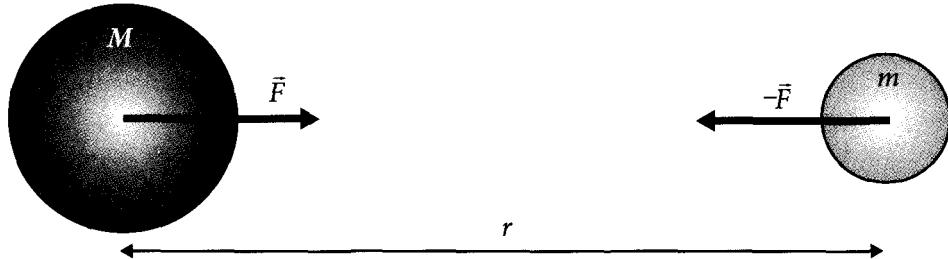
Таким образом, можно записать этот закон одним равенством, как показано в формуле (1). А переходя к абсолютным величинам, получаем

$$|\vec{F}_{A \rightarrow B}| = |-\vec{F}_{B \rightarrow A}|.$$

Теперь хорошо видно, что действие и противодействие совпадают по величине, а знак «-» говорит о том, что их направления противоположны. Использование уравнений поможет тебе записать законы Ньютона в более простой и точной форме, чем их словесная формулировка.

СИЛА ПРИТЯЖЕНИЯ И ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ

В самом узком смысле сила притяжения — это сила, с которой Земля притягивает к себе находящиеся на ней тела. Эта сила возникает из-за всемирного тяготения, действующего между всеми телами, обладающими массой. Между двумя телами всегда есть сила притяжения, прямо пропорциональная произведению их масс и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними. Эта сила притяжения и есть проявление закона *всемирного тяготения*, открытого Ньютона. Он называется всемирным, потому что действует на все тела, имеющие массу, вне зависимости от их типа. Величина этой силы зависит только от масс взаимодействующих тел и от расстояния между ними.



Как показано на рисунке, два тела с массами M и m , находящиеся на расстоянии r , притягиваются друг к другу с силой F . Эта закономерность описывается уравнением

$$F = G \frac{mM}{r^2}. \quad (2)$$

G — универсальная константа, называемая *гравитационной постоянной*.

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} (\text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2).$$

Н, или ньютон, — единица силы (см. стр. 93).

Всемирное тяготение соответствует закону действия и противодействия, так как силы действуют на оба тела с массами M и m . Записанное равенство (2) мож-

но использовать для вычисления этих сил. Направления этих сил, очевидно, противоположны, а значит, закон действия и противодействия выполняется. Следует помнить, что этому закону подчиняются не только тела, непосредственно соприкасающиеся друг с другом, но и тела, находящиеся на некотором удалении друг от друга.

Силы всемирного тяготения очень малы по сравнению с электромагнитными силами. Однако если электромагнитные силы могут быть как притягивающими, так и отталкивающими, в зависимости от сочетания положительных и отрицательных зарядов, то всемирное тяготение — это всегда сила притяжения, т. е. тела стремятся друг к другу.

Под действием всемирного тяготения межзвёздная пыль в открытом космосе собирается в огромные массивные объекты, такие, как наша Земля и другие планеты. В Японии есть пословица: «Из пылинок собираются горы», но получается, что это относится не только к горам, но и к звёздам.

2

СИЛА
И ДВИЖЕНИЕ



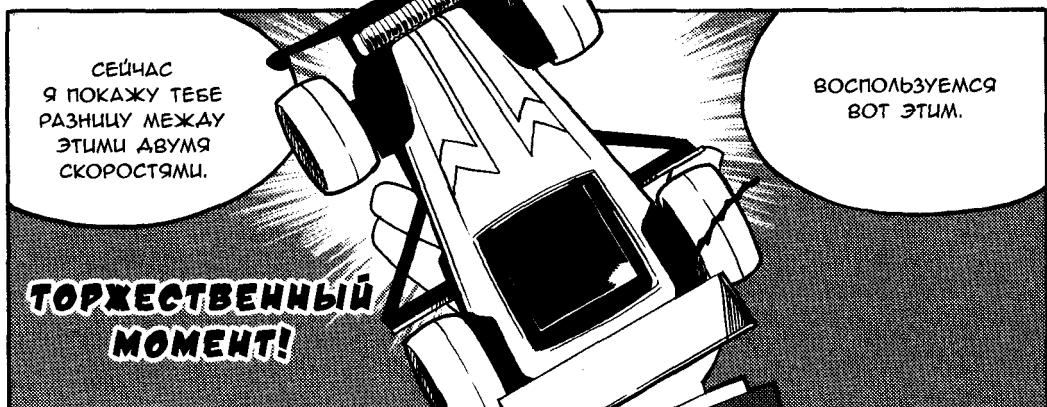
● РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ



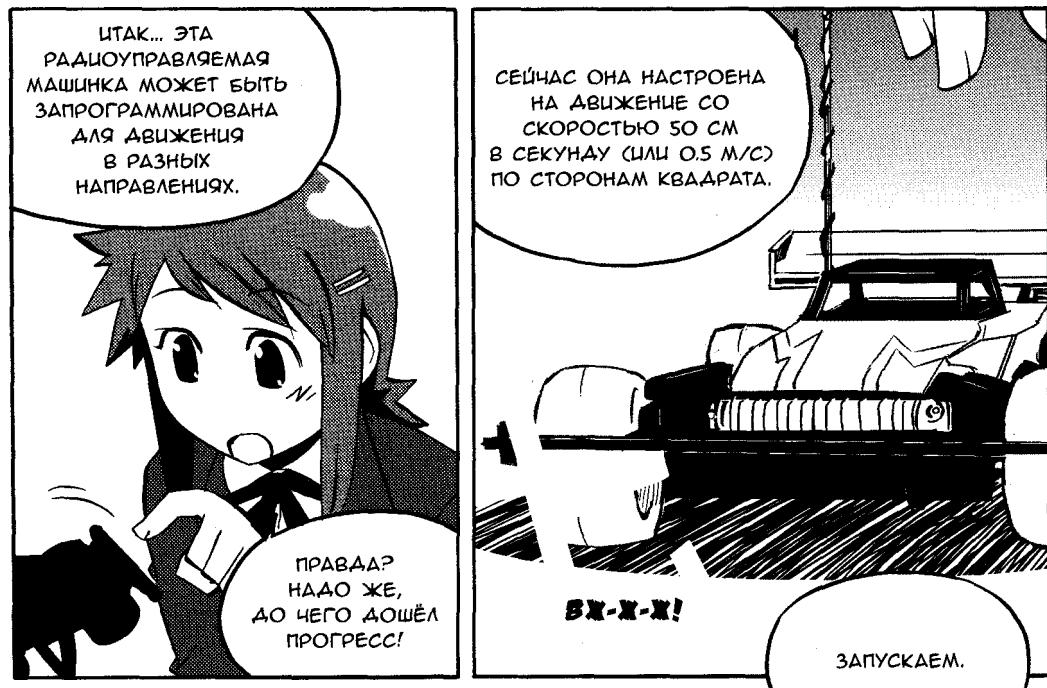
ПРЕЖДЕ ЧЕМ
МЫ ПЕРЕЙДЁМ К ЗАКОНАМ
ДВИЖЕНИЯ, НАМ НУЖНО
УЗНАТЬ, ЧТО ТАКОЕ СКО-
РОСТЬ И УСКОРЕНИЕ. НАЧ-
НЁМ СО СКОРОСТИ, ПРОЩЕ
ВСЕГО НАМ ПРЕДСТАВИТЬ,
ЧТО...

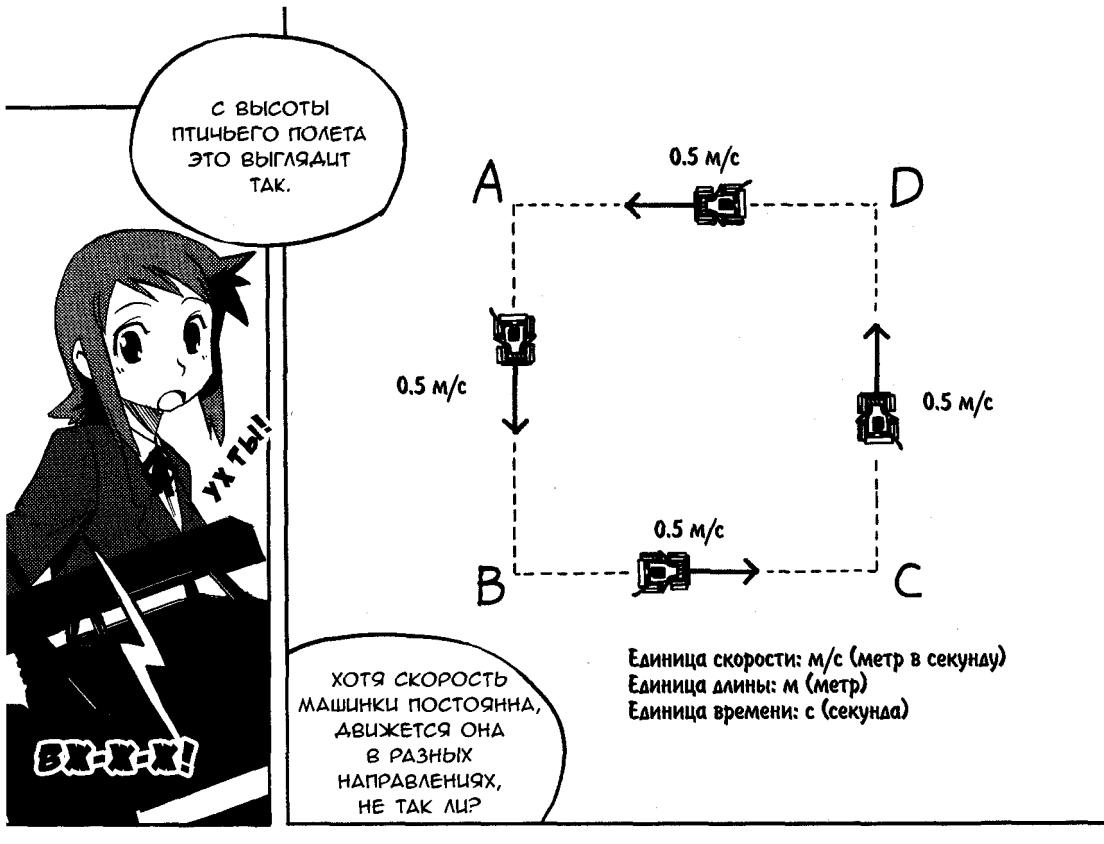






**ТОРЖЕСТВЕННЫЙ
МОМЕНТ!**







В ЭТОМ СЛУЧАЕ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ НАЗЫВАЕТСЯ УСКОРЕНИЕМ, КОТОРОЕ МОЖНО РАССЧИТАТЬ С ПОМОЩЬЮ СЛЕДУЮЩЕЙ ФОРМУЛЫ:

$$\text{ускорение} = \frac{\text{изменение скорости}}{\text{время}}$$

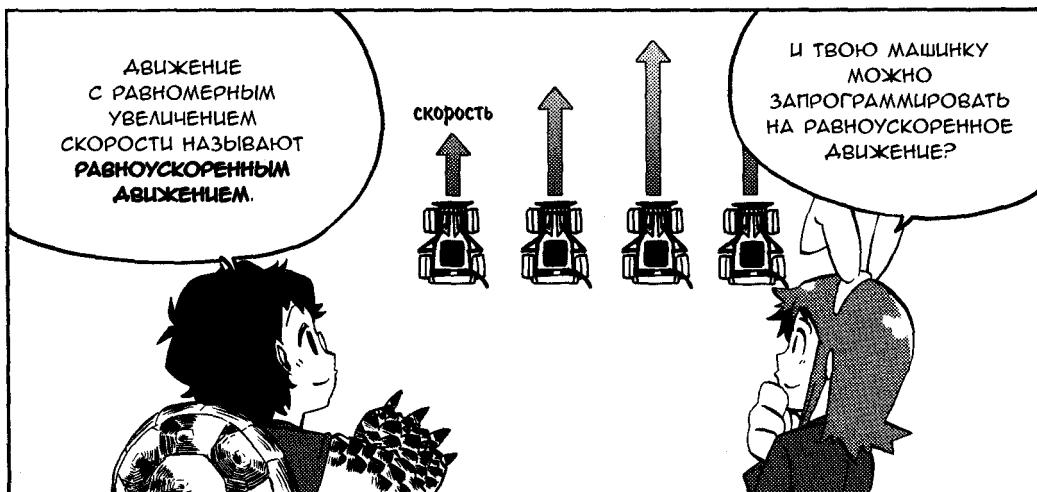
УГУ.

ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ — МЕТР В СЕКУНДУ В КВАДРАТЕ, ЗАПИСЫВАЕТСЯ КАК М/С². УСКОРЕНИЕ ПОКАЗЫВАЕТ, КАК ИЗМЕНИЛСЯ СКОРОСТЬ (М/С) ЗА СЕКУНДУ.

КЛАЦ-КЛАЦ-КЛАЦ

ТО ЕСТЬ МЫ ДЕЛИМ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ НА ВРЕМЯ.





О да, моя машинка может двигаться равноускоренно. А теперь посчитаем её ускорение, используя формулу.



ПОСМОТРИМ... РАДИОУПРАВЛЯЕМАЯ МАШИНКА РАЗГОНЯЕТСЯ ОТ 0 ДО 0.5 М/С ЗА 4 СЕКУНАДЫ.

Формула:

$$\text{ускорение} = \frac{\text{изменение скорости}}{\text{время}}$$

мы можем поставить эти значения в формулу.

ТОГДА ПОЛУЧИМ:
ИЗМЕНЕНИЕ
НА 0.5 М/С ЗА 4 С –
ЭТО 0.125 М/С²!
ВЕРНО?



АБСОЛЮТНО!

ДЕРЖИСЬ
УВЕРЕННЕЕ,
У ТЕБЯ ВСЁ
ПОЛУЧАЕТСЯ.

ПОЛУЧЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ГОВОРИТ О ТОМ, ЧТО СКОРОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ НА 0.125 М/С ЗА СЕКУНДУ.

ПОНЯТНО.

ИСПОЛЬЗУЯ ЭТУ ФОРМУЛУ,
МЫ МОЖЕМ НАЙТИ ПРОЙДЕННОЕ РАССТОЯНИЕ ДАЖЕ ДЛЯ ТЕЛ, АВИЖУЩИХСЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ.

Лаб НАЙДЁМ ПРОЙДЕННОЕ РАССТОЯНИЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ



Теперь поменяем настройки так, чтобы скорость равномерно возрастила от 0 до 0.5 м/с (метров в секунду). Вот тебе вопрос. Дано, что скорость достигла 0.5 м/с за 4 секунды. Какое расстояние преодолела при этом радиоуправляемая машинка?



Хм... в начале было 0 м/с, максимальное значение 0.5 м/с. Рассчитаем расстояние, исходя из среднего значения скорости, равного 0.25 м/с.



$$0.25 \text{ м/с} \times 4 \text{ с} = 1 \text{ м!}$$



Верно! Ты такая сообразительная! Но можешь ли ты объяснить, почему ты получила правильный ответ, решая таким способом?



Э...м-м... не забывай, что учить меня — это твоя работа, Нономура-сан!



Ха-ха, не поспоришь! Но прежде чем дать тебе ответ на этот вопрос, я объясню, как мы можем найти пройденное расстояние при переменной скорости. Когда скорость постоянна, мы знаем, что пройденное расстояние можно найти, умножив скорость на время (скорость \times время). Пусть x м (метров) — это расстояние, пройденное за t с (секунд), а постоянная скорость — v м/с, тогда выражение

$$\text{расстояние} = \text{скорость} \times \text{время}$$

можно выразить следующей простой формулой:

$$x = vt.$$



Ну, это и ежу понятно!



Если изобразить это соотношение на графике, у которого по вертикальной оси отмечается скорость, а по горизонтальной — время, то вот что получится:



Площадь затенённой области соответствует пройденному расстоянию. Данный график обычно называют графиком $v(t)$, так как он связывает скорость и время. Расстояние — это площадь прямоугольника длиной t и высотой v .



Ясно. Только немного странно, что площадь соответствует расстоянию.



Площадь здесь — это не обычная площадь геометрической фигуры, ведь мы работаем с графиком, подобные которому ты видела на уроках математики. Площадь прямоугольника как геометрической фигуры можно измерить в квадратных метрах (м^2). Но в нашем случае по горизонтальной оси откладывают время (в секундах), а по вертикальной оси — скорость (в $\text{м}/\text{с}$). Поэтому их произведение даёт « $\text{с} \times \text{м}/\text{с} = \text{м}$ ».

А это — единица длины.



Легко найти путь, когда тело движется с постоянной скоростью.
А что же делать, если скорость непостоянна?



Всё, что у нас есть, — это равенство
 $\text{расстояние} = \text{скорость} \times \text{время}.$

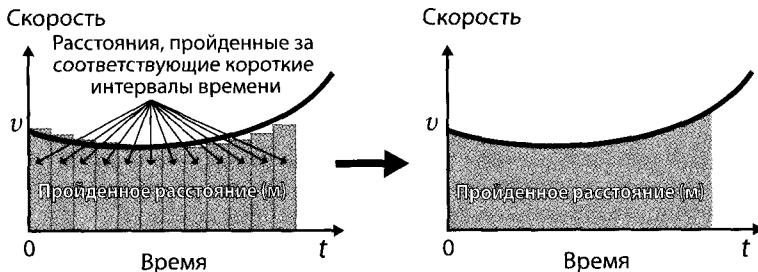
Поэтому мы можем поделить время на интервалы, чтобы получить много маленьких прямоугольников, а затем соответствующим образом посчитать путь, предполагая, что в каждом временному интервале скорость постоянна.



Что ты имеешь в виду?



Посмотри на левый график внизу.



Таким образом, мы можем найти площадь каждого из узких прямоугольников, полученных при разделении времени на короткие интервалы, а затем сложить их и получить пройденное расстояние.



Но ведь эти маленькие прямоугольники не будут в точности соответствовать графику. Их «верхушки» параллельны горизонтальной оси. Разве они не приведут к ошибкам?



Я понимаю, о чём ты. Тогда мы можем снова разделить прямоугольники на ещё более мелкие части. Повторяя это разделение на более мелкие интервалы, мы будем получать с каждым разом более точное значение пути, пока всё не сойдется, как показано на правом верхнем графике.



Ну, наверное... если можно так поступать...



Если мы разделим всё время движения машинки на бесконечно узкие прямоугольники, то сможем точно рассчитать, какое расстояние она преодолела. Ведь предельное значение, которое мы получаем при делении графика «расстояние = скорость × время» на короткие временные интервалы, равно площади под этим графиком. Поэтому мы можем найти пройденное расстояние, посчитав соответствующую площадь.
Итак,

пройденное расстояние = площадь под графиком $v(t)$.



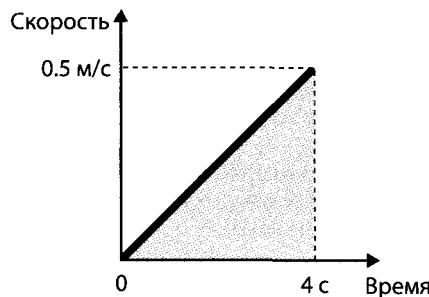
Теперь, имея в виду полученный результат, давай-ка разберемся, почему интуитивно посчитанное тобой расстояние оказалось верным.



Хорошо!



Твой первоначальный расчёт — то же самое, что и расчёт площади под графиком скорость—время. Пример с радиоуправляемой машинкой можно изобразить на графике следующим образом.



Площадь под графиком, посчитанная по формуле для площади треугольника, равна

$$\frac{1}{2} \times \text{основание (время)} \times \text{высота (максимальная скорость)} = \\ = \frac{1}{2} \times 4 \text{ с} \times 0.5 \text{ м/с} = 1 \text{ м.}$$



Это соответствует пройденному расстоянию.

Мы получили 1 метр, как и в первоначальном расчёте.

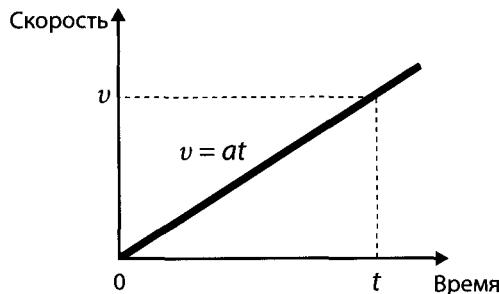


Теперь найдём общее выражение для пройденного расстояния, без использования конкретных числовых значений. Пусть v — это скорость, a — ускорение, тогда соотношение между скоростью и временем для равноускоренного движения

$$v = at.$$

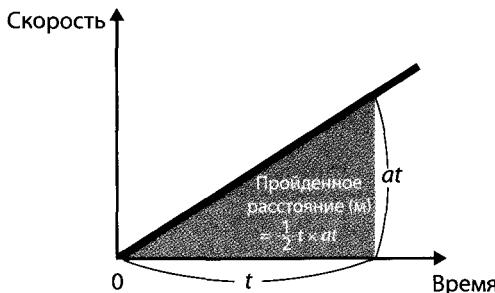


На графике $v(t)$ это будет выглядеть так.



Пусть d — расстояние, пройденное за время t ; его значение должно равняться площади треугольника с основанием t и высотой at (равной конечной скорости тела), т. е.

$$d = \frac{1}{2} at^2.$$



Понятно?



Эм-м-м... да, я поняла, в чём тут дело! Если применить эту формулу к примеру с радиоуправляемой машинкой, получим

$$\frac{1}{2} \times 0.125 \text{ м/с}^2 \times (4 \text{ с})^2 = 1 \text{ м.}$$

Как и должно быть!



Теперь, Ниномия-сан, ты можешь рассчитать расстояние, пройденное при равноускоренном движении, не только по наитию, но и научным методом.

ЗАКОН ИНЕРЦИИ

ТЕПЕРЬ ДАДАЙ
РАССМОТРИМ
ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА
ПОД АКТИВИСТИЧЕСТВОМ
СИЛЫ.

ПУСТЬ
СНАЧАЛА ТЕЛО
НАХОДИТСЯ
В СОСТОЯНИИ
ПОКОЯ.

ТО
ЕСТЬ?

В ЭТОМ СЛУЧАЕ
ДЕЙСТВУЮЩАЯ
НА НЕГО СИЛА
РАВНА НУЛЮ.

СТОП!

НО НАДО ПОНИМАТЬ, ЧТО,
ХОТЯ МЫ И ГОВОРЯМ, ЧТО СИЛА
РАВНА НУЛЮ, НА САМОМ ДЕЛЕ
ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО СИЛЫ,
ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТЕЛО,
УРАВНОВЕШИВАЮТ ДРУГ ДРУГА.

АГА, КАК В ПРИМЕРЕ
С МЯЧОМ, ВЕРНО?

Сила,
действующая
со стороны
руки

ЭТО ОЗНАЧАЕТ, ЧТО СИЛА,
ПОЛУЧЕННАЯ СЛОЖЕНИЕМ
ВСЕХ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ
НА ТЕЛО, ТО ЕСТЬ РАВНОДЕЙ-
СТВУЮЩАЯ, РАВНА НУЛЮ.

Сила
тяжести

ВЫХОДИТ, ЭТО
НЕ ОЗНАЧАЕТ, ЧТО СИЛЫ
НЕ ПРИЛОЖЕНЫ ВОВСЕ,
НЕ ТАК ЛИ?

ЧТОБЫ БЫЛО
ЛЕГЧЕ
ПОНЯТЬ...

Я КОЕ-ЧТО
ПРИГОТОВИЛ
ДЛЯ ТЕБЯ!

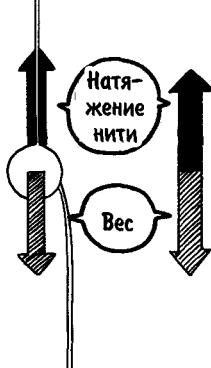
ХОП!

ОЙ-ОЙ-ОЙ,
ЧТО ЭТО?

НЕ ПУГАЙСЯ. ЭТО
ПРОСТО МЯЧ С ДВУМЯ
ВЫХОДЯЩИМИ
ИЗ НЕГО НИТИМИ.

ПРОСТИ. А Я-ТО
ПОДУМАЛА, ЧТО
ЭТО ПРИШЕЛЬЦЫ
ИЗ КОСМОСА.

Потолок



Натяжение
нити

+

Вес

Ноль

В ДАННЫЙ
МОМЕНТ МЯЧ
НЕ ПОДВИЖЕН.

ЗНАЧИТ, СО СТОРОНЫ
НИТИ НА НЕГО ДОЛЖНА
ДЕЙСТВОВАТЬ СИЛА,
УРАВНОВЕШИВАЮЩАЯ СИЛУ
ТЯЖЕСТИ (ВЕС), ЧТОБЫ
РЕЗУЛЬТИРУЮЩАЯ СИЛА
БЫЛА РАВНА НУЛЮ.

ТЫ ХОЧЕШЬ
СКАЗАТЬ, ЧТО СИЛА
НАТЯЖЕНИЯ НИТИ
РАВНА СИЛЕ
ТЯЖЕСТИ?

КАК ТЫ МОЖЕШЬ
ЭТО УТВЕРЖДАТЬ,
НЕ СДЕЛАВ
ИЗМЕРЕНИЙ?

В ТОМ-ТО
ВСЁ И ДЕЛО.

НА САМОМ ДЕЛЕ УТВЕРЖДЕНИЕ О ТОМ, ЧТО НА ПОКОЯЩЕЕСЯ ТЕЛО НЕ ДЕЙСТВУЕТ СИЛА, ОСНОВАНО НА ПЕРВОМ ЗАКОНЕ НЬЮТОНА.



КАК ЭТО?

КОНЕЧНО, МОЖНО УДОСТОВЕРИТЬСЯ В ТОМ, ЧТО НАТЯЖЕНИЕ НИТИ РАВНО ВЕСУ МЯЧА, С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА...

...НО ЭТО НЕОБЯЗАТЕЛЬНО, ТАК КАК ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА ГОВОРИТ НАМ, ЧТО РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА ДЛЯ НЕПОДВИЖНОГО ТЕЛА ДОЛЖНА БЫТЬ РАВНА НУЛЮ.

ДОПУСТИМ.

НО ТОГДА... БУДЕТ ЛИ РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ РАВНЯТЬСЯ НУЛЮ, ЕСЛИ ПОТЯНУТЬ ЗА ВТОРУЮ НИТЬ?

Я РАССКАЖУ ТЕБЕ И ПРО ЭТО...

НО СНАЧАЛА ДАВАЙ ПРОСТО ПОТЯНЕМ ЗА НИТЬ, ПРИВЯЗАННУЮ К МЯЧУ, ТО ЕСТЬ ПРИЛОЖИМ ТРЕТЬЮ СИЛУ.

О-ПА

ДЭРР!

МЯЧ ОСТАЕТСЯ НЕПОДВИЖНЫМ И В ЭТОМ ПОЛОЖЕНИИ, А ЗНАЧИТ,

И СЕЙЧАС РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА РАВНЕТСЯ НУЛЮ.

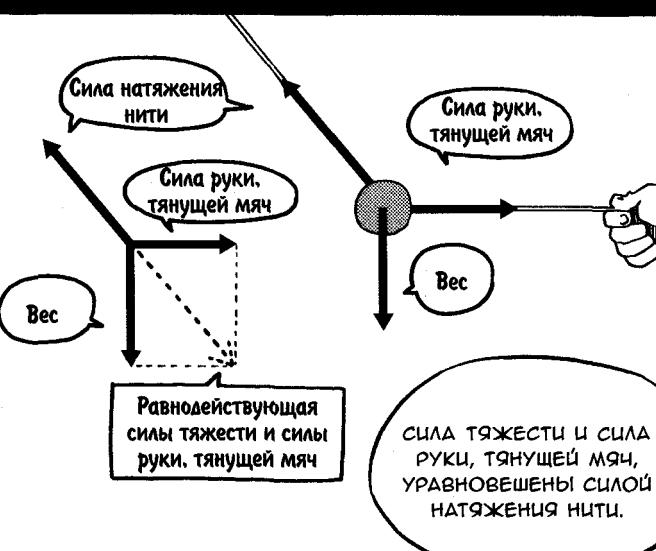
стоп!

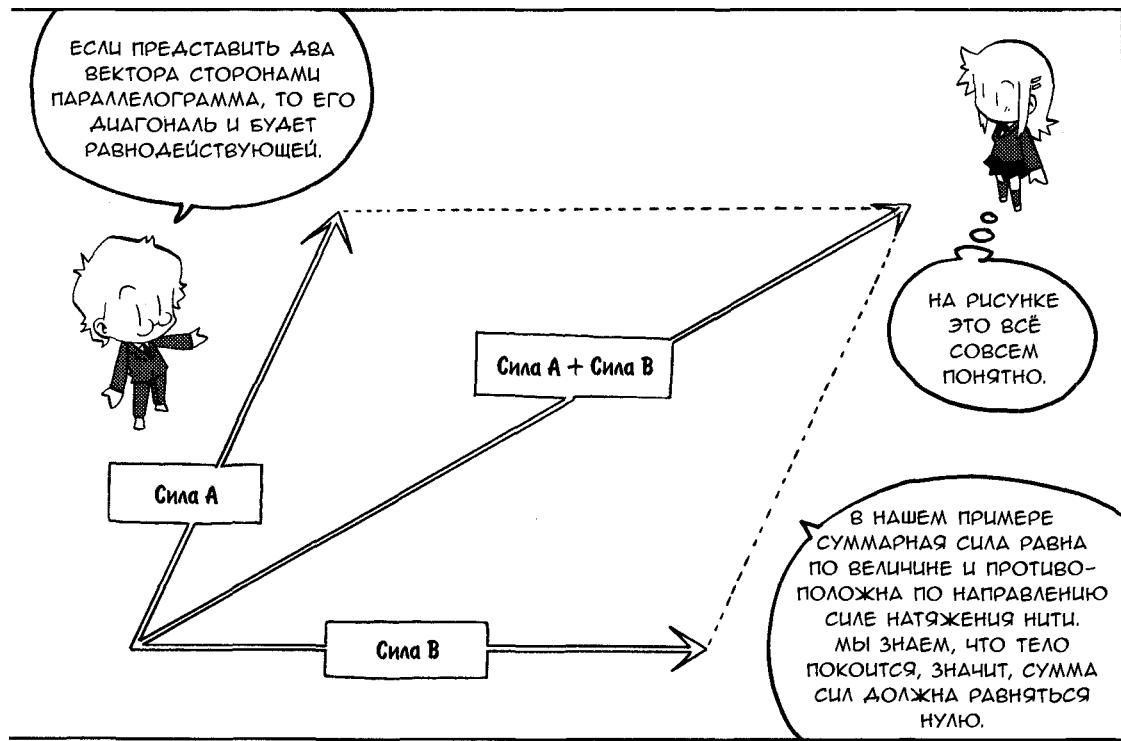


ВЗГЛЯНУВ НА ВСЕ ТРИ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА МЯЧ, МЫ ВИДИМ, ЧТО СИЛА ТЯЖЕСТИ (ВЕС) НАПРАВЛЕНА ВЕРТИКАЛЬНО, А СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ СО СТОРОНЫ РУКИ, — ГОРИЗОНТАЛЬНО.

Потолок

ДРУГИМИ СЛОВАМИ, СИЛУ ТЯЖЕСТИ И СИЛУ РУКИ, ТЯНУЩЕЙ МЯЧ, МОЖНО СЛОЖИТЬ. А МОЖЕМ ЛИ МЫ РАЗДЕЛИТЬ СИЛУ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ НА ДВЕ?







*На орбите тела всегда находятся в состоянии свободного падения, отчего их кажущийся вес равен нулю.





ЗАКОН УСКОРЕНИЯ

$$F = ma$$

ТЕПЕРЬ ИЗУЧИМ
ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА
В ТОМ СЛУЧАЕ, КОГДА
К НЕМУ ПРИЛОЖЕНА
СИЛА.

ТЫ ЕЗДИШЬ
В ШКОЛУ НА ВЕЛОСИ-
ПДЕ, НЕ ТАК ЛИ,
НИНОМИЯ-САН?

ПРИВЕТ,
ПОДРУЖКИ!

ЭЙ, ЭТО
МЕГУ!

АА. ХОДЯ ОТ ДОМА
ДО ШКОЛЫ
ДОВОЛЬНО
ДАЛЕКО.

КОНЕЧНО, ТЫ ПОНИМАЕШЬ,
ЧТО ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ
ПРИВЕСТИ ПОКОЯЩИЙСЯ
ВЕЛОСИПЕД В ДВИЖЕНИЕ,
НУЖНО НАЧАТЬ КРУТИТЬ
ПЕДАЛИ.

УХ!

ТО ЕСТЬ БЛАГОДАРЯ
ПРИЛОЖЕНИЮ СИЛЫ ОН
ВЫХОДИТ ИЗ СОСТОЯНИЯ
ПОКОЯ И ПРИОБРЕТАЕТ
ОПРЕДЕЛЁННУЮ
СКОРОСТЬ.

ЗНАЧИТ, ЕГО СКОРОСТЬ
ИЗМЕНИЛАСЬ. АРУГИМИ
СЛОВАМИ, БЛАГОДАРЯ
ПРИЛОЖЕННОЙ СИЛЕ
ВОЗНИКЛО УСКОРЕНИЕ.

ХМ, ХМ...







ТЕПЕРЬ ВЫРАЗИМ
ЭТО С ПОМОЩЬЮ
ФОРМУЛЫ,
КОТОРУЮ МОЖНО
ИСПОЛЬЗОВАТЬ
ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ.

ПУСТЬ
 a — УСКОРЕНИЕ;
 F — СИЛА;
 m — МАССА,
ТОГДА...



$$a = \frac{F}{m}$$

МЫ ПОЛУЧАЕМ
СЛЕДУЮЩЕЕ.

ВОТ ЧТО ПОКАЗЫВАЕТ ЭТА
ФОРМУЛА: ЕСЛИ СИЛА F
УДВАИВАЕТСЯ, ТО
УДВАИВАЕТСЯ И УСКОРЕНИЕ a .
ЕСЛИ ЖЕ УДВАИВАЕТСЯ
МАССА m , ТО УСКОРЕНИЕ a
УМЕНЬШАЕТСЯ В ДВОЕ.

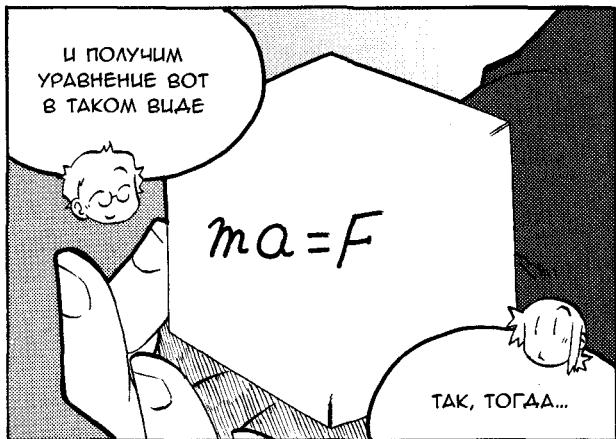
$$1 = \frac{1}{1} m$$

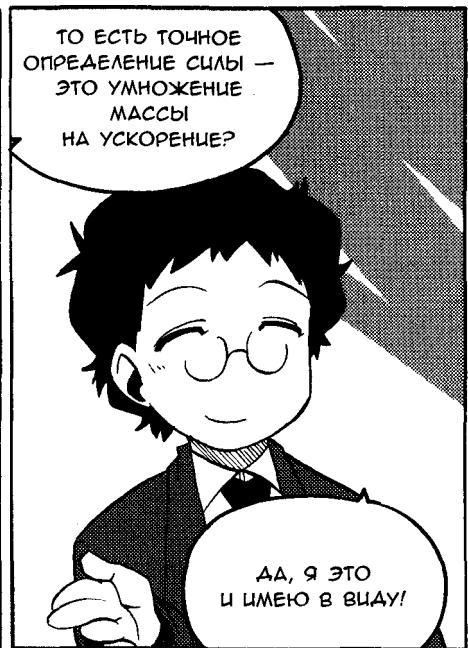
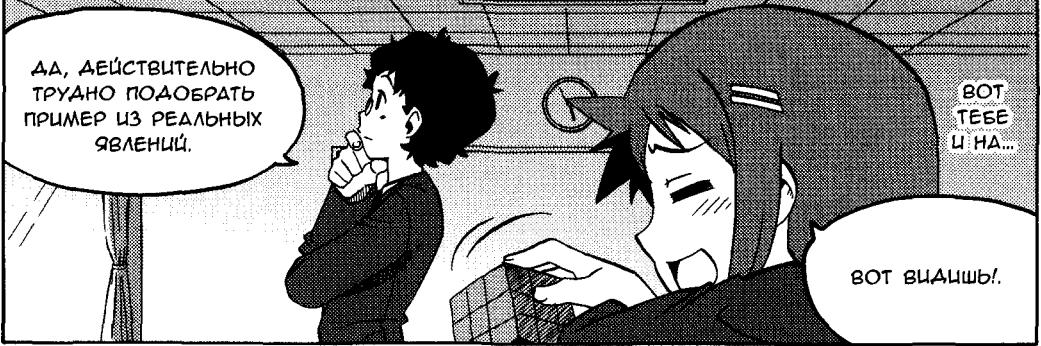
$$2 = \frac{2}{1} F$$

ВЖИК

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{2} F$$

ЗДОРОВО!
КОГДА ПОЯВЛЯЕТСЯ
ФОРМУЛА, ЭТО
УЖЕ СТАНОВИТСЯ
ПОХОЖЕ
НА ФИЗИКУ...





Лаб НАХОДИМ ТОЧНОЕ ЗНАЧЕНИЕ СИЛЫ



Немного ранее мы толкали друг друга, стоя на роликах. Допустим, я снял наше движение на видео.



Я не знала, что ты нас снимал!



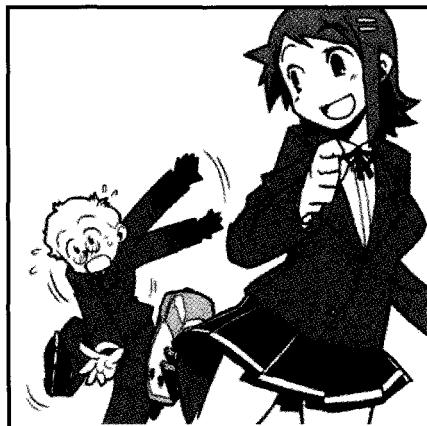
Да нет же, я просто придумываю возможную ситуацию.



Ох, не пугай меня так. Какое отношение это имеет к сегодняшнему разговору?



Предположим, что я проанализировал запись и нарисовал график $v(t)$ твоего движения.



На графике видно, что скорость резко возрастает от нуля, когда я была в состоянии покоя, а затем плавно спадает. Но начальный рост скорости какой-то неровный.



Мы делим время на определённые интервалы и считаем, что в пределах этих интервалов движение было равноускоренным.



Допустим...



Если движение равноускоренное, то ускорение можно найти по формуле «ускорение = изменение скорости / время», не так ли? Положим, что ускорение, которое ты получила под действием силы от моих рук, составило 0.6 м/с^2 . Умножив его на массу твоего тела, равную 40 кг, получим

$$F = ma = 40 \text{ кг} \times 0.6 \text{ м/с}^2 = 24 \text{ (кг·м/с}^2\text{), или 24 Н.}$$



Значит, сила, которую я приложила к тебе, была равна 24 Н. Вот оно что! Мы смогли определить точное значение силы.



Таким образом, значение силы может быть получено измерением ускорения, которое тело получило под её действием, и последующим умножением на массу этого тела. Этот метод можно использовать и для измерения других сил.

ДВИЖЕНИЕ МЯЧА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

ТЕПЕРЬ, КОГДА
МЫ ЗНАЕМ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
СИЛЫ...

...ДАВАЙ
ПОДУМАЕМ О ЕЁ
НАПРАВЛЕНИИ.

ТО ЕСТЬ
О НАПРАВЛЕНИИ
ДЕЙСТВИЯ
СИЛЫ?

ЧИК-ЧИК

АА, О НАПРАВЛЕНИИ
ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ,
ПРИЛОЖЕННОЙ
К БРОШЕННОМУ МЯЧУ.

НАРИСУЙ НАПРАВЛЕНИЕ
СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ
НА МЯЧ, КОГДА ОН
НАХОДИТСЯ В ТОЧКАХ
"А", "В" И "С".

СОПРОТИВЛЕ-
НИЕМ ВОЗДУХА
МОЖНО
ПРЕНЕБРЕЧЬ.

Напра-
вление
броска

A

Положение
через 0.2 с
после броска

B

Положение
через 0.4 с

C

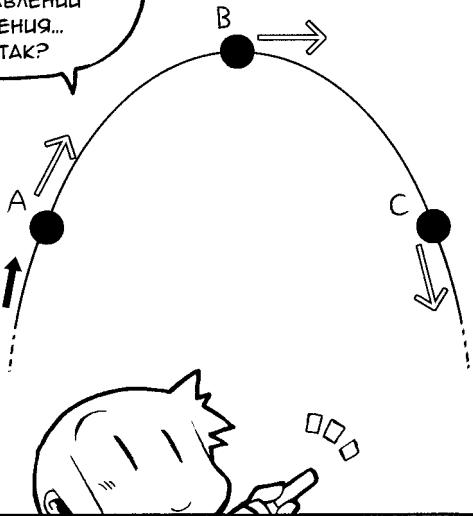
Положение
через 0.6 с

ААЙ-КА
ПОДУМАТЬ...
МЯЧ ЛЕТИТ ПОД
ДЕЙСТВИЕМ
СИЛЫ.

КРУТЬ-
КРУТЬ



ТАК КАК СИЛА
ДОЛЖНА
ДЕЙСТВОВАТЬ
В НАПРАВЛЕНИИ
ДВИЖЕНИЯ...
ВОТ ТАК?



ЭХ...
ВСЁ-ТАКИ
ТЫ ОТВЕТИЛА
ТАК...

ЧПОК

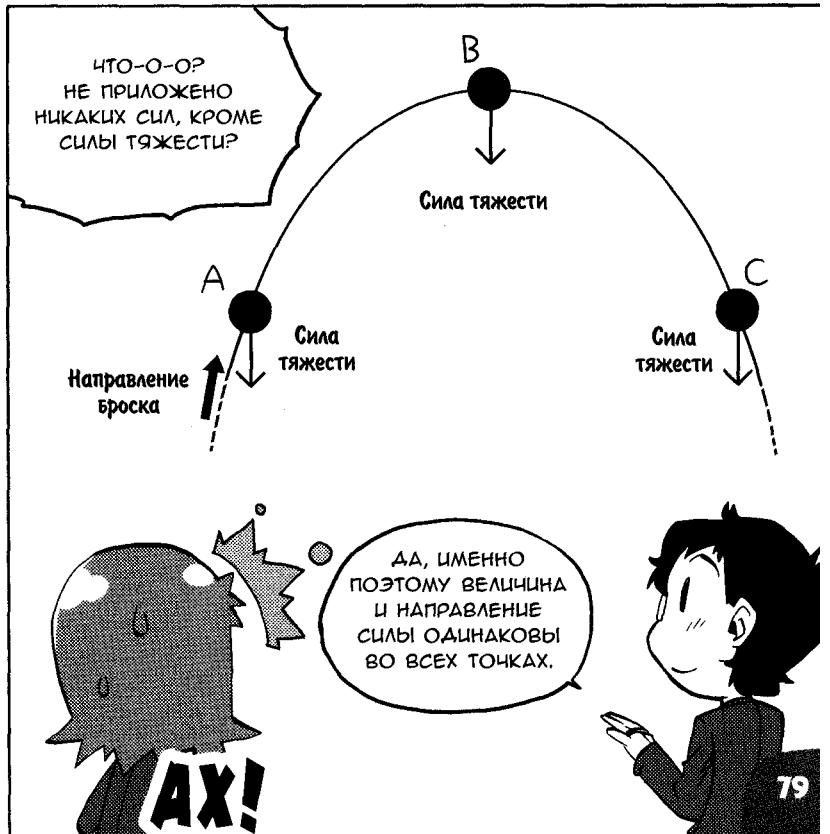
ОЙ, ПО-МОЕМУ,
ОН СОБЫРАЕТСЯ
МЕНЯ
ПОДЛОВИТЬ...

ГДЕ НА ТВОЕМ
ВЕРХНЕМ РИСУНКЕ
СИЛА ТЯЖЕСТИ,
КОТОРАЯ ДОЛЖНА
ДЕЙСТВОВАТЬ
НА МЯЧ?

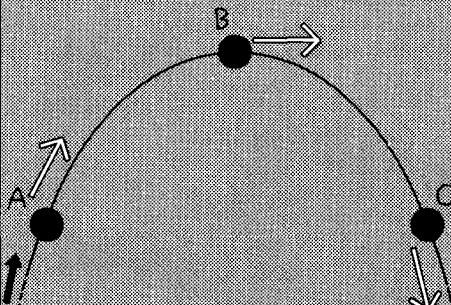
ТАК... Я ДУМАЛА,
ЧТО РИСУЮ
РАВНОДЕЙСТВУЮЩУЮ
ВСЕХ СИЛ, ВКЛЮЧАЯ
СИЛУ ТЯЖЕСТИ.

В ТОЧКЕ
"А" ТЫ ИЗОБРАЗИЛА
СИЛУ, ДЕЙСТВУЮЩУЮ
НА МЯЧ ПОД УГЛОМ
ВВЕРХ. ОТКУДА ОНА
ВЗЯЛАСЬ?

НУ... ЭТО СИЛА,
КОТОРУЮ РУКА
ПРИЛОЖИЛА К МЯЧУ,
РАЗВЕ НЕТ?



НО РАЗВЕ МЯЧ
НЕ ОПИСЫВАЕТ
КРИВУЮ, ДВИГАСЬ
В ВОЗДУХЕ?



АА, НО ЭТО ПОТОМУ,
ЧТО МЕНЯЕТСЯ
НАПРАВЛЕНИЕ
СКОРОСТИ.

И ТВОЙ РИСУНОК
НА САМОМ ДЕЛЕ
ПОКАЗЫВАЕТ НАПРА-
ЛЕНИЕ СКОРОСТИ,
А НЕ СИЛЫ.

НАПРАВЛЕНИЕ
СКОРОСТИ,
ГОВОРИШЬ...

НЕ ДУМАЙ,
ЧТО СИЛА
ДЕЙСТВУЕТ
В НАПРАВЛЕНИИ
ДВИЖЕНИЯ!

НАПРИМЕР, СИЛА,
ТОРМОЗЯЩАЯ ТЕЛО,
ДЕЙСТВУЕТ В НАПРАВЛЕНИИ,
ПРОТИВОПОЛОЖНОМ
НАПРАВЛЕНИЮ СКОРОСТИ,
ТАК ВЕДЬ?



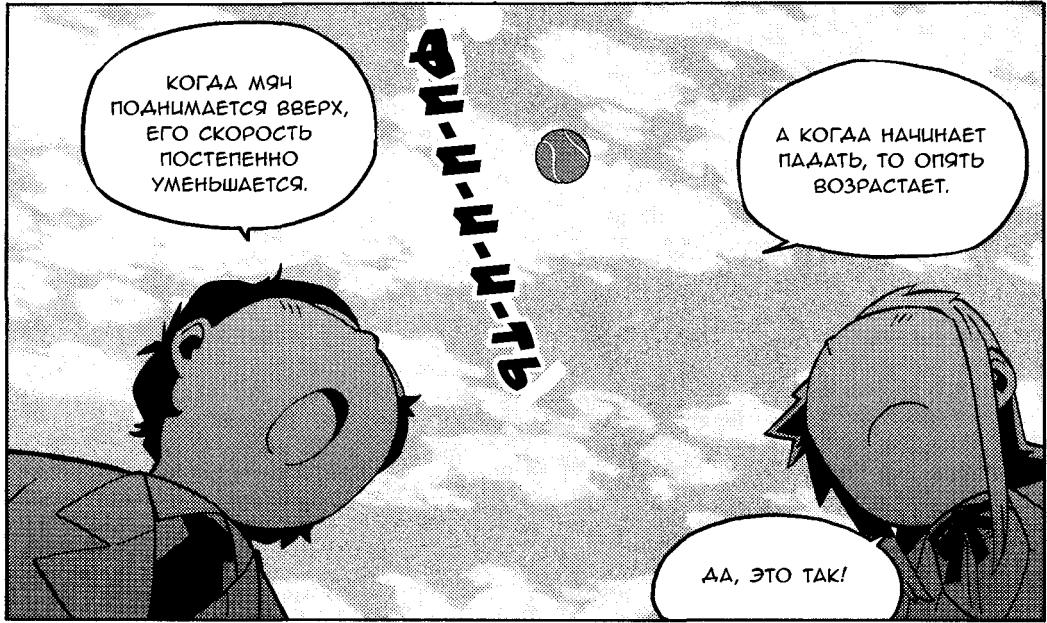
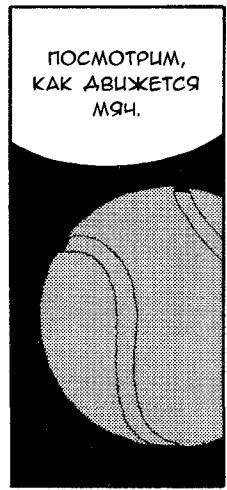
А ВЕДЬ ТОЧНО.
ЭТО ДЕЙСТВИ-
ТЕЛЬНО ТАК.

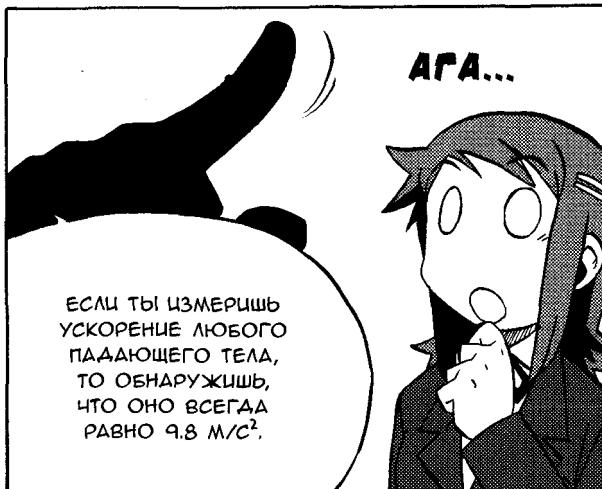
НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ
ТЕЛА ОБЫЧНО НЕ СОВПА-
ДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ
ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА НЕГО
СИЛЫ.

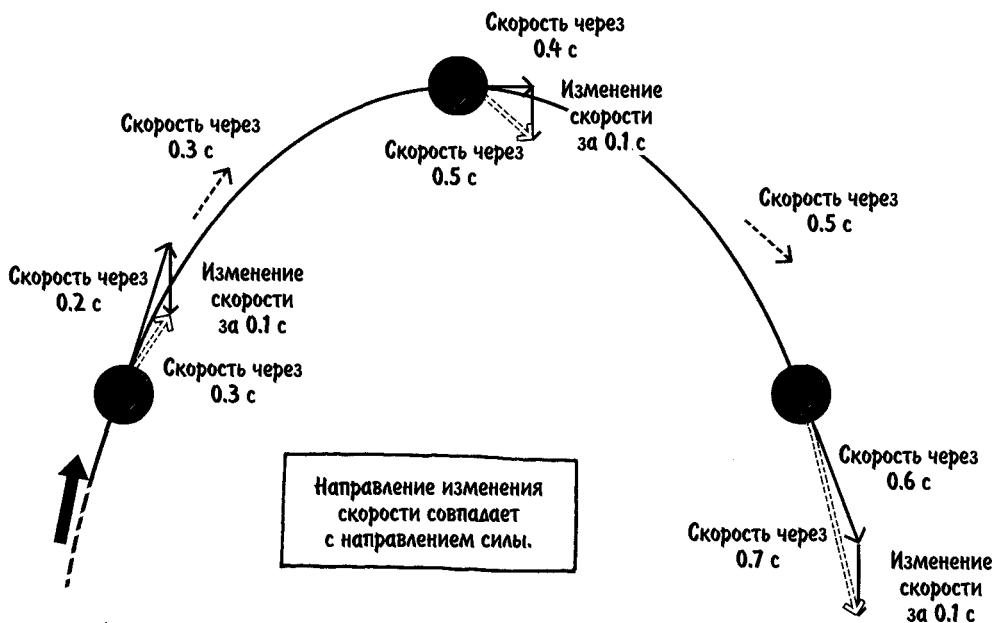
ОДНАКО...

...НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ
ВСЕГДА СОВПАДАЕТ
С НАПРАВЛЕНИЕМ
УСКОРЕНИЯ.

ВАЖНО!







Направление изменения скорости совпадает с направлением силы.

ТАК КАК УСКОРЕНИЕ — ЭТО ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ЗА ЕДИНЦУ ВРЕМЕНИ, ЗНАЧИТ, ВЕКТОР ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ, ТАК ЖЕ КАК И ВЕКТОР УСКОРЕНИЯ, ВСЕГДА БУДЕТ НАПРАВЛЕН ВНИЗ.

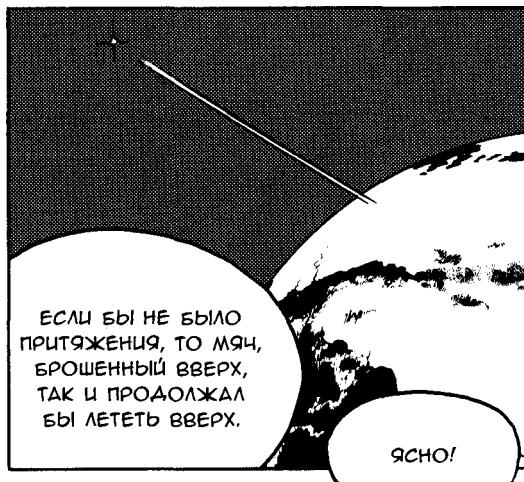
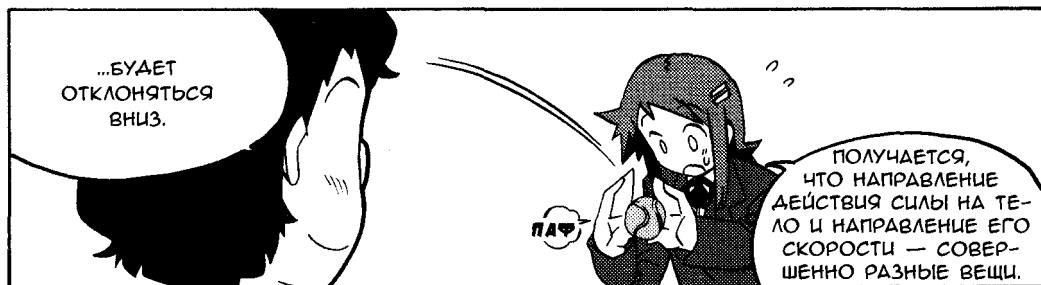
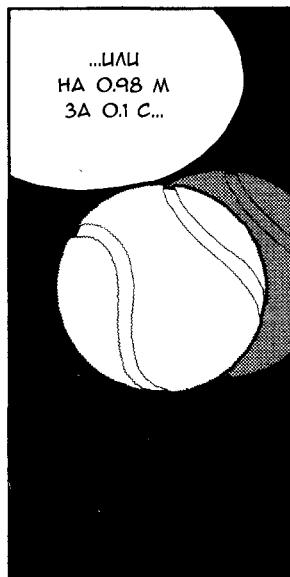


КАК ПОКАЗАНО ПУНКТИРНЫМИ СТРЕЛКАМИ, ВЕКТОР СКОРОСТИ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ БУДЕТ ВСЁ БОЛЬШЕ ОТКЛОНЯТЬСЯ ВНИЗ.



ТАК ВОТ ПОЧЕМУ СКОРОСТЬ УМЕНЬШАЕТСЯ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВВЕРХ И ВОЗРАСТАЕТ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВНИЗ.





А СЕЙЧАС
МОГУ Я КОЕ-ЧТО
СПРОСИТЬ У ТЕБЯ,
НИНОМЦЫ-САН?

ПОНИМАЕШЬ ЛИ
ТЫ РАЗНИЦУ МЕЖДУ
"СИЛОЙ" В ПОВСЕ-
ДНЕВНОЙ ЖИЗНИ
И ТОЙ "СИЛОЙ",
О КОТОРОЙ ЦАЁТ
РЕЧЬ В ФИЗИКЕ?

ДА, БЛАГОДАРЯ
ТВОИМ
РАЗЪЯСНЕНИЯМ
ЭТО ВПЛОНЕ
ПОНЯТНО.

ИТАК, МЫ В ОБЩИХ ЧЕРТАХ
ИЗУЧИЛИ ТРИ ЗАКОНА
НЬЮТОНА: ЗАКОН ИНЕРЦИИ,
ЗАКОН УСКОРЕНИЯ,
ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ
И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.



И ТЫ ОБЪЯСНИЛ
ЭТО ТАК
ДОХОДЧИВО,
НОНОМУРА-КУН.

ВСЕГДА
РАД
ПОМОЧЬ.

МЕХАНИКА БЕЗ
ПРЕУВЕЛИЧЕНИЯ
ОСНОВАНА НА ТРЕХ
ЗАКОНАХ — ТЕХ САМЫХ,
ЧТО МЫ ИЗУЧИЛИ!

УХ ТЫ, ПРАВДА!
ДОЛЖНО БЫТЬ, ЭТО
ОЧЕНЬ ВАЖНЫЕ
ЗАКОНЫ!

ДАЛЕЕ МЫ
ПОЗНАКОМИМСЯ
С ИМПУЛЬСОМ.

НЕ
РАССЛАБЛЯЙСЯ!

ХОРОШО!
ХА-ХА!

ОПЯТЬ МЫ
ЗАСЫДЕ-
ЛИСЬ!

...ЭТИ АВОЕ...

ПОЧЕМУ ОНИ
ВСЁ ВРЕМЯ
ЗАНИМАЮТСЯ
ВМЕСТЕ
В КАБИНЕТЕ
ФИЗИКИ?

ПО-ДО-ЗРИ-
ТЕЛЬНО...

ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!

ТРИ УРАВНЕНИЯ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрим равноускоренное движение тела вдоль прямой линии. Пусть начальная скорость тела равна v_0 , скорость тела через время t равна v_2 , расстояние, пройденное за время t , равно x , а ускорение тела равно a . Тогда справедливы следующие три уравнения:

$$v = at + v_0; \quad (1)$$

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2; \quad (2)$$

$$v^2 - v_0^2 = 2ax. \quad (3)$$

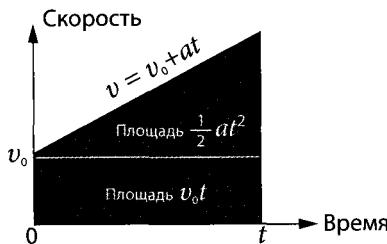
Давай выведем эти уравнения. Начнём с уравнения (1). Если ускорение постоянно, то можно записать:

изменение скорости = ускорение \times время.

Так как изменение скорости равно $v - v_0$, ускорение равно a , а время t , то из соотношения «изменение скорости = ускорение \times время» получаем равенство, соответствующее уравнению (1):

$$v = at + v_0.$$

Получим уравнение (2). На стр. 56...58 мы выяснили, что расстояние, пройденное телом, можно выразить как площадь под графиком $v(t)$. Согласно уравнению (1), график $v(t)$ будет иметь вид, изображённый на рисунке.



Площадь под этим графиком $v(t)$ равна пройденному телом расстоянию.

Так как площадь нижнего прямоугольника равна $v_0 t$, а площадь верхнего треугольника — $\frac{1}{2} a t^2$, то мы получаем равенство, соответствующее уравнению (2):

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2.$$

Примечание. Строго говоря, x — это не «расстояние», а «перемещение». В случае $x < 0$ пройденное расстояние записывают как $|x|$.

Уравнение (3) можно получить, исключив t из уравнений (1) и (2). Для начала решим уравнение (1) относительно t :

$$t = \frac{v - v_0}{a}.$$

Если теперь подставить это значение в уравнение (2), то результатом будет следующее равенство:

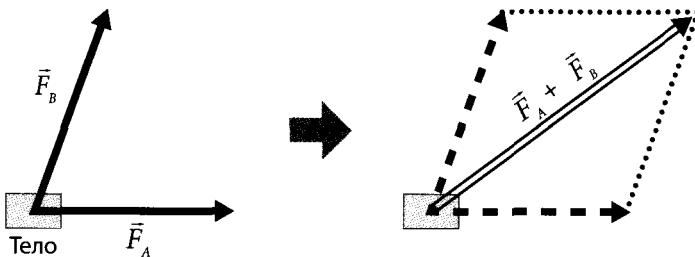
$$x = v_0 \left(\frac{v - v_0}{a} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{v - v_0}{a} \right)^2 = \frac{(2v_0v - 2v_0^2) + (v^2 - 2v_0v + v_0^2)}{2a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

Теперь просто умножаем обе части равенства на $2a$ и получаем уравнение (3)!

СЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ ПО ПРАВИЛУ ПАРАЛЛЕЛОГРАММА

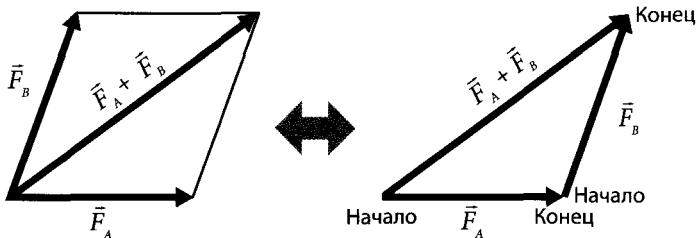
Так как сила — вектор, то расчёты нужно проводить согласно правилам обращения с векторами, описанными в Главе 1. Если два вектора лежат на одной прямой, то складывать их легко — их модули нужно либо сложить, либо вычесть, если они противонаправлены (см. Глава 1).

Однако в реальной жизни нам придётся складывать векторы во всех возможных направлениях. Для этого воспользуемся правилом параллелограмма (стр. 64).



Пусть на тело действуют две силы — \vec{F}_A и \vec{F}_B , как на рисунке слева. Этот случай идентичен действию на тело одной силы, показанной двойной стрелкой на рисунке справа. Эта двойная стрелка показывает результирующую $\vec{F}_A + \vec{F}_B$ двух сил, приложенных к телу.

Величина и направление равнодействующей определяются по правилу сложения векторов (стр. 38), объяснённому в Главе 1. Это показано в правой части следующего рисунка. Вектор $\vec{F}_A + \vec{F}_B$ представляет собой диагональ параллелограмма, стороны которого образованы двумя векторами — \vec{F}_A и \vec{F}_B , как видно из левой части рисунка, значит, правило параллелограмма выполняется.

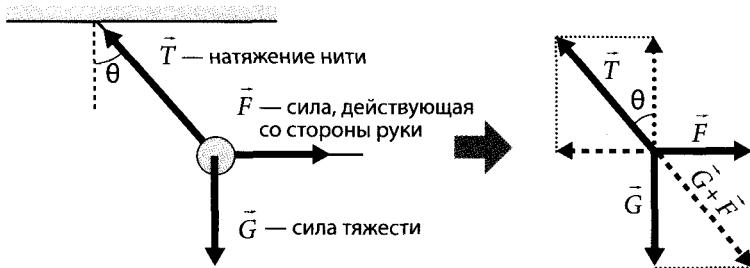


Это правило применимо для сложения не только сил, но и любых векторов. Другими словами, по правилу параллелограмма производится сложение двух векторов любой природы.

Рассматривая два лежащих на одной прямой вектора как сплющенный до предела параллелограмм, можно сказать, что их сложение тоже производится по правилу параллелограмма. Кроме того, равнодействующую трёх и более сил можно найти, применив правило параллелограмма соответствующее число раз.

СЛОЖЕНИЕ И РАЗЛОЖЕНИЕ СИЛ

Так как силы — векторы, их можно складывать по правилу сложения векторов. Это называется сложением сил. И наоборот, для упрощения задачи можно один вектор силы разложить на два или более векторов. Такая процедура называется разложением силы.



Рассмотрим более подробно равновесие сил в случае, когда груз, подвешенный к потолку, тянут в горизонтальном направлении (см. стр. 63). Как показано на рисунке вверху, сила тяжести — \vec{G} , сила, с которой рука тянет груз в горизонтальном направлении, — \vec{F} , и сила натяжения нити — \vec{T} . Так как груз неподвижен, эти три силы уравновешены. Таким образом, векторное сложение этих сил даёт ноль:

$$\vec{G} + \vec{F} + \vec{T} = 0.$$

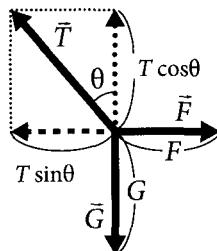
Это равенство можно переписать следующим образом:

$$\vec{G} + \vec{F} = -\vec{T}.$$

Теперь вернёмся к нашему рисунку и рассмотрим его с учётом горизонтальной и вертикальной составляющих. Так как тело покоятся, то силы в горизонтальном направлении должны в сумме давать ноль. Аналогично сумма сил по вертикали также должна равняться нулю.

Это уравнение показывает, что вектор $\vec{G} + \vec{F}$, полученный сложением силы тяжести \vec{G} и силы тяги в горизонтальном направлении \vec{F} , равен по модулю и противоположен по направлению силе натяжения нити \vec{T} (см. правую часть рисунка выше).

Однако нельзя ли выразить равновесие сил, не прибегая к векторам, пользуясь только абсолютной величиной сил? Обозначим модуль силы тяжести $|\vec{G}| = G$, модуль силы, тянувшей в горизонтальном направлении, $|\vec{F}| = F$, модуль силы натяжения нити $|\vec{T}| = T$, угол между нитью и вертикалью — θ .



Из условия равновесия горизонтальных составляющих сил следует:

$$F = T \sin\theta. \quad (\text{A})$$

Из условия равновесия вертикальных составляющих сил следует:

$$G = T \cos\theta. \quad (\text{B})$$

Теперь если мы просто поделим уравнение (A) на уравнение (B), то сможем исключить силу натяжения:

$$\frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \frac{F}{G}.$$

Отсюда

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{F}{G}.$$

А это значит, что мы можем выразить силу, действующую со стороны руки, через силу тяжести и угол, на который отклонилась нить!

$$F = G \operatorname{tg}\theta.$$

ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

«Тело, на которое не действует сила, находится в состоянии покоя или движется равномерно и прямолинейно». Здесь выражение «не действует сила» означает, что равнодействующая равна 0. Даже если к телу приложено множество сил, но их сумма равна 0, то результат тот же — «сила на тело не действует». Если изолированное тело находится в открытом космосе, где нет гравитации, и не испытывает действия никаких сил, то это тело будет вечно покояться или двигаться равномерно и прямолинейно.

С другой стороны, на тело, которое лежит на столе, действует сила тяжести. Однако к нему приложена также вертикально направленная сила сопротивления со стороны стола, поэтому равнодействующая сила равна 0.

ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА

Когда на тело действует сила, оно движется с ускорением, пропорциональным действующей силе. Так как сила и ускорение — это векторные величины, значит, этот закон описывает отношение между векторами. Пусть приложенная к телу сила равна \vec{F} , ускорение тела равно \vec{a} , а масса тела равна m , тогда второй закон Ньютона описывается следующим равенством:

$$m\vec{a} = \vec{F}$$

Масса характеризуется только численным значением, т. е. это скалярная величина. Однако всегда необходимо обращать внимание на направление силы и ускорения. Согласно первому закону Ньютона, если нет действия силы, то тело может двигаться только прямолинейно. Для того чтобы изменить направление движения тела, необходимо приложить силу. Уравнение движения описывает, как меняется направление движения в зависимости от силы.

Рассмотрим случай с радиоуправляемой машинкой, передвигающейся по сторонам квадрата (стр. 51). Когда машинка едет прямо, её движение является равномерным и прямолинейным, а значит, действующая сила (равнодействующая сил) равна нулю. Но когда машинка совершает поворот на 90 градусов, на неё, хотя бы короткое время, действует ненулевая сила (для автомобилей — это сила, возникающая при изменении направления колёс), и машинка совершает ускоренное движение. Без этого ускорения было бы невозможно изменить направление скорости.

Кроме того, велосипед на стр. 68 приведён в качестве близкого примера для пояснения утверждения: «Ускорение прямо пропорционально силе и обратно пропорционально массе». Однако связь между направлением силы и направлением ускорения на самом деле сложна. Ведь в велосипеде происходят сложные пре-

образования между прикладываемой силой и движением: вращательное движение, возникающее при нажатии на педали, через шестерёнки и цепь вызывает вращательное движение колёса, и велосипед благодаря силе трения между колесом и землёй движется вперёд.

❸ НАПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ, УСКОРЕНИЯ И СИЛЫ

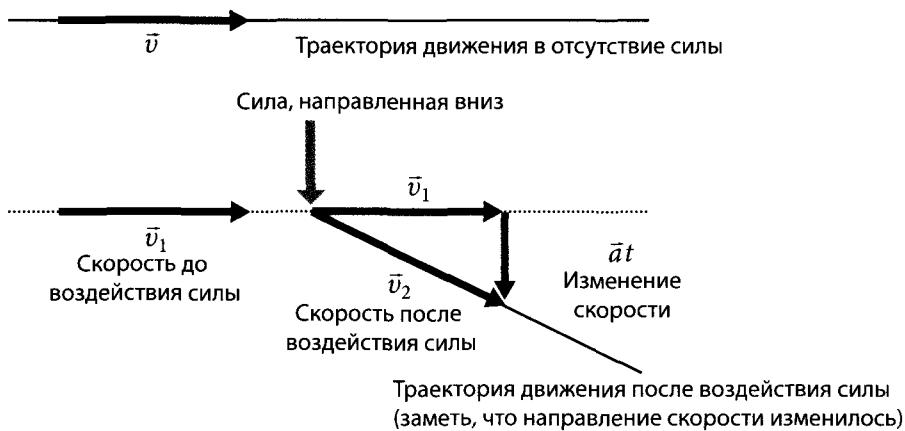
Согласно второму закону Ньютона направление ускорения всегда совпадает с направлением силы. Однако направление скорости не зависит напрямую от направлений силы или ускорения. Из соотношения между ускорением и скоростью (введённым на стр. 52) следует равенство

$$\text{изменение скорости} = \text{ускорение} \times \text{время}.$$

А это значит, что направление изменения скорости совпадает с направлением ускорения! Это тонкое, но важное различие.

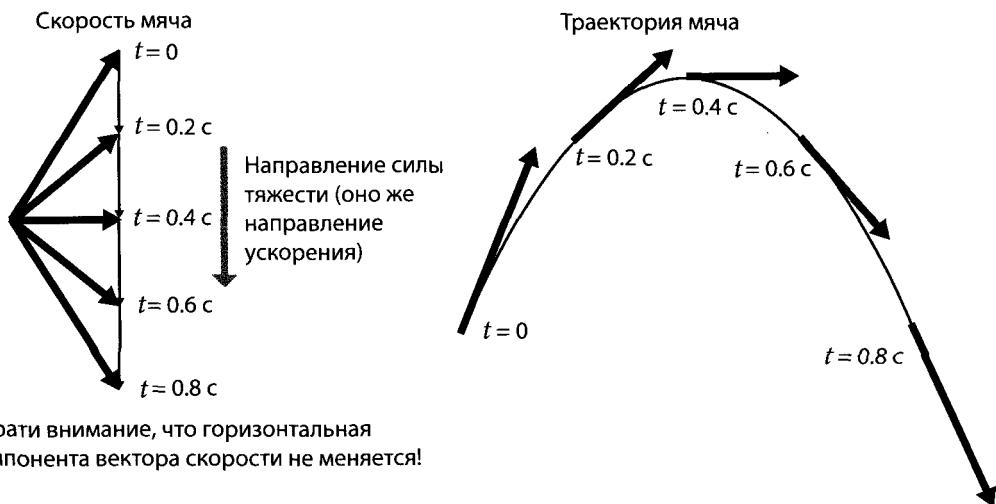
Обратимся к примеру. Предположим, что тело движется с постоянной горизонтально направленной скоростью \vec{v}_1 . На него не действует сила, оно движется с этой скоростью по прямой линии в соответствии с первым законом Ньютона. Но как изменится скорость тела, если на него в течение времени t действует сила, направленная вертикально? Пусть ускорение, создаваемое этой силой, равно \vec{a} , а скорость после воздействия силы равна \vec{v}_2 , тогда мы получаем следующее равенство:

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = \vec{a}t, \text{ или } \vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{a}t.$$



Таким образом, сила изменяет направление движения тела. Кроме того, направление скорости показывает направление движения.

В примере на стр. 77 на мяч продолжает действовать сила тяжести. Так как сила тяжести всегда постоянна и направлена вниз, изменение скорости тоже постоянно происходит в вертикальном направлении. Другими словами, скорость мяча в горизонтальном направлении остаётся постоянной — изменение, направленное вниз, будет происходить только в вертикальном направлении (правая часть рисунка внизу). Траектория представляет собой кривую, соединяющую направления изменяющейся скорости. Как видно из рисунка, она имеет вид параболы.



Обрати внимание, что горизонтальная компонента вектора скорости не меняется!

ТЕЛО НЕ ОБЛАДАЕТ СИЛОЙ

Те, кто поверхностно знаком с физикой, склонны считать, что движущееся тело обладает силой. Это распространённое, но неверное представление. Как мы выяснили в Главе 1, силы образуются между парными объектами, воздействующими друг на друга. Движущееся тело само по себе не обладает силой, поддерживающей это движение.

Вновь обратимся к мячу, брошенному вверх под некоторым углом к горизонту. На мяч действует сила со стороны руки до тех пор, пока он от неё не отделится. (В ответ, согласно закону действия и противодействия, на руку действует сила со стороны мяча, но она не имеет никакого отношения к его движению.) Как только мяч отделяется от руки, на него действует только сила тяжести со стороны Земли, т. е. сила, приложенная рукой к мячу, после отделения мяча от руки не сохраняется.

❶ ЕДИНИЦА СИЛЫ – НЬЮТОН (Н)

Единица силы определена на основе уравнения движения:

$$\text{сила} = \text{масса} \times \text{ускорение}.$$

В данном уравнении единица массы — килограмм (кг), а единица ускорения — метр в секунду в квадрате ($\text{м}/\text{с}^2$). Поэтому единица силы равна $\text{кг} \times \text{м}/\text{с}^2$. Так как сила в физике является очень важной величиной, для неё введена специальная единица под названием ньютон (Н):

$$1 \text{ ньютон} = 1 (\text{кг} \times \text{м}/\text{с}^2).$$

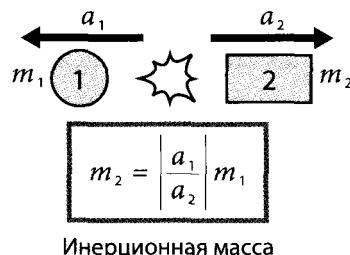
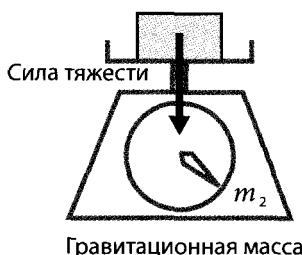
Как ты можешь догадаться, эта единица получила своё название в честь великого учёного Исаака Ньютона, заложившего основы физики. Сила в 1 Н эквивалентна силе, необходимой для придания телу массой 1 кг ускорения 1 $\text{м}/\text{с}^2$.

❷ КАК ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ МАССА И СИЛА

Как определить массу тела? Считается, что массу тела можно измерить, например, с помощью весов, но при таком измерении используется известный из опыта факт: сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна его массе. Масса, измеренная с помощью силы тяжести, носит название гравитационной.

С другой стороны, из уравнения движения следует, что масса — это величина, показывающая, насколько трудно придать телу ускорение. Эта масса не связана напрямую с силой тяжести. Масса, фигурирующая в уравнении движения (масса = сила/ускорение), называется инерционной массой.

Инерционную массу можно принципиально измерить, совместив второй закон Ньютона и закон действия и противодействия. Для начала нам необходимо тело с известной массой (назовём его контрольным телом и обозначим m_1 на рисунке внизу). Затем возьмём тело, массу которого хотим измерить (назовём его измеряемым телом и обозначим m_2 на рисунке), и сделаем так, чтобы оно про-взаимодействовало с контрольным телом через столкновение. В этом столкновении внешние силы на тела не действуют.



Тогда силы взаимодействия контрольного тела и тела измерения будут подчиняться закону действия и противодействия. То есть будут равны их численные значения.

Если $F_1 = m_1 a_1$ и $F_2 = m_2 a_2$, то $F_1 = F_2$ в соответствии с законом действия и противодействия. Следовательно, это выражение можно записать так:

$$m_1 a_1 = m_2 a_2.$$

Так как мы ищем массу измеряемого тела m_2 , то перепишем равенство следующим образом:

$$m_2 = \frac{m_1 a_1}{a_2}.$$

Естественно, ускорения тел направлены в противоположные стороны, поэтому мы используем только их абсолютные значения.

Ускорение тела можно найти, измерив пройденное этим телом расстояние и время, за которое оно его прошло. Зная расстояние и время, можно найти инерционную массу измеряемого тела.

Хотя эксперименты показали, что гравитационная масса и инерционная масса одинаковы, законы Ньютона об этом ничего не говорят. Наше понимание этого соотношения исходит от Эйнштейна, основавшего общую теорию относительности на принципе эквивалентности, т. е. на идеи равенства гравитационной и инерционной масс. В настоящее время равенство инерционной и гравитационной масс экспериментально подтверждено с очень высокой точностью. Кроме того, эталоном массы является «международный прототип килограмма», который хранится в Международном бюро мер и весов во Франции.

Теперь, когда у нас есть надёжный способ определить массу, мы можем определить силу, как на стр. 75. Другими словами, мы прикладываем измеряемую силу к телу заданной массы. Тело под действием этой силы получает ускорение, которое мы измеряем. Подставив эти значения в выражение

масса × ускорение = сила,

мы определим силу.

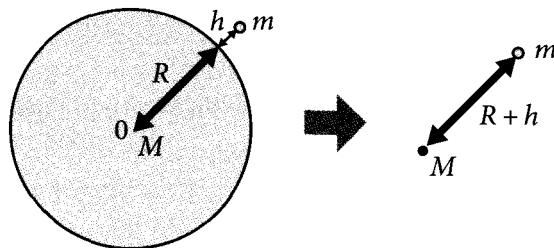
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Сила тяжести, действующая на тело со стороны Земли, задаётся следующим выражением:

$$F = mg.$$

В этом уравнении g — ускорение свободного падения, равное примерно 9.8 м/с^2 вблизи поверхности Земли. Покажем, что данное уравнение выводится

из закона всемирного тяготения. Рассмотрим силу всемирного тяготения, действующую между Землёй и телом массой m , которое находится на высоте h , как показано на рисунке.



Допустим, что Земля — шар с радиусом R , массой M и однородной плотностью. В этом случае мы можем считать, что гравитация, создаваемая шаром за пределами поверхности Земли, эквивалентна гравитации, создаваемой точечной массой M , расположенной в центре (правая часть рисунка).

Итак, сила тяжести, действующая на тело со стороны Земли, в соответствии с законом всемирного тяготения равна

$$F = G \frac{Mm}{(R+h)^2}.$$

Тогда сила тяжести вблизи поверхности Земли (где $h = 0$) записывается следующим образом:

$$F = G \frac{Mm}{R^2}.$$

Заменив выражение, содержащее постоянные величины, латинской буквой g :

$$G \frac{M}{R^2} = g,$$

получим

$$F = mG \frac{M}{R^2} = mg.$$

Радиус Земли равен примерно 6.38×10^6 м, а её масса — около 5.98×10^{24} кг. Воспользовавшись этими значениями, рассчитаем g :

$$g = G \frac{M}{R^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{5.98 \times 10^{24}}{(6.38 \times 10^6)^2} \approx 9.8 \text{ м/с}^2.$$

Это — ускорение свободного падения. Обрати внимание, что оно не зависит от массы меньшего тела (m). Строго говоря, Земля не является шаром с однород-

ной плотностью, и ускорение свободного падения у её поверхности незначительно меняется в различных точках. Но даже в этом случае можно с хорошей точностью считать его равным 9.8 м/с^2 .

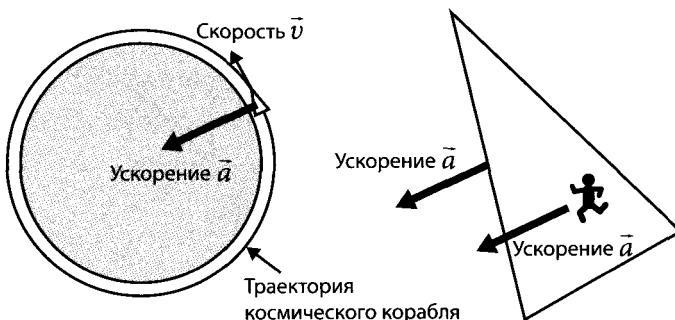
Кстати, каково будет ускорение свободного падения на высоте орбиты космического челнока «Шаттл»? Высота орбиты «Шаттла» от поверхности Земли составляет что-то около 300...500 км. Если принять $h = 500 \text{ км}$, то

$$R + h = (6.38 \times 10^6 \text{ м}) + (0.5 \times 10^6 \text{ м}) = 6.88 \times 10^6 \text{ м.}$$

Используя полученное значение, можно найти ускорение свободного падения на данной высоте:

$$g = G \frac{M}{(R + h)^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{5.98 \times 10^{24}}{(6.88 \times 10^6)^2} \approx 8.4 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, на космический корабль действует сила тяжести, составляющая примерно 86 процентов ($8.4/9.8 = 0.86$) от силы тяжести на поверхности Земли. Но так как расстояние от земной поверхности до корабля равно приблизительно одной десятой радиуса Земли, то разумно предположить, что и на корабль сила тяжести все ещё оказывает сильное влияние.



Но тогда почему кажется, что внутри космического корабля гравитации нет? Это происходит потому, что корабль всё время «падает» под действием земного притяжения. Эйнштейн говорил, что если оборвётся трос, удерживающий лифт, то человек внутри падающего лифта окажется в состоянии невесомости, словно в открытом космосе. Как и у лифта с оборванным тросом, ускорение космического корабля направлено к центру Земли из-за гравитации. Однако у корабля есть ещё горизонтальная скорость, направленная перпендикулярно силе тяжести, поэтому он вращается вокруг Земли, описывая круговую (в общем случае — эллиптическую) орбиту. Не только космический корабль, но и все предметы и астронавты, находящиеся внутри него, «падают» с одинаковым ускорением свободного падения, поэтому там возникает состояние невесомости.

ДВИЖЕНИЕ МЯЧА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

На стр. 83 мы рассмотрели мяч, совершающий параболическое движение. Здесь мы исследуем движение брошенного мяча с помощью формул.

Примем горизонтальное направление за x , вертикальное — за y , массу мяча — за m . Сила тяжести, действующая на мяч, равна mg и направлена вниз по оси y . Запишем вектор силы тяжести в координатной форме:

$$\begin{array}{l} \downarrow \text{сила в направлении } x \\ F = (0, -mg). \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \uparrow \text{сила в направлении } y \end{array}$$

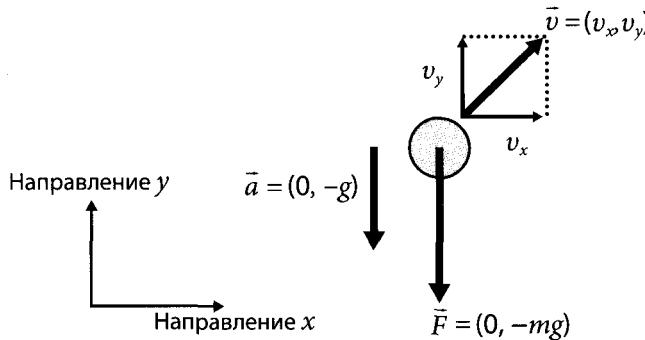
Если при этом также выразить и ускорение $\vec{a} = (a_x, a_y)$, то уравнение движения $m\vec{a} = \vec{F}$ можно разложить по направлениям x и y :

$$\begin{array}{l} ma_x = 0; \\ ma_y = -mg. \end{array}$$

Отсюда получаем

Ускорение в направлении x : $a_x = 0$;

Ускорение в направлении y : $a_y = -g$.

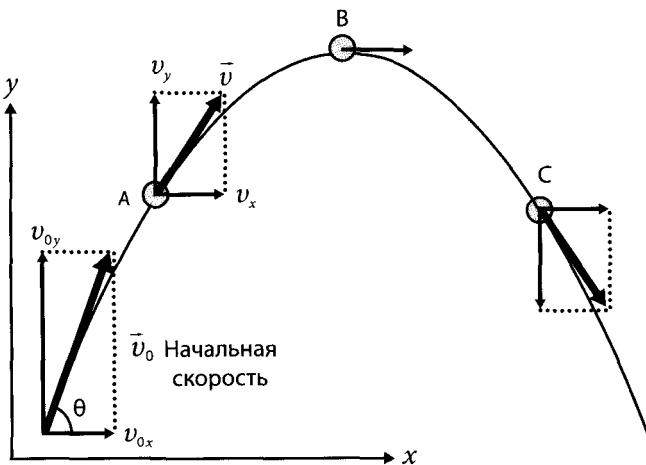


То есть мяч движется с постоянной скоростью в направлении x , а в направлении y движение равноускоренное.

Допустим, мы знаем эти значения, тогда мы можем найти скорость мяча в любой момент времени. В момент броска время $t = 0$, а скорость равна $v_0 = (v_{0x}, v_{0y})$. Из уравнения (1) на стр. 87 получаем

$$\begin{array}{l} v_x = v_{0x}; \\ v_y = v_{0y} - gt. \end{array}$$

Эти уравнения показывают, что скорость не меняется в направлении x , но меняется в направлении y на -9.8 м/с за секунду ($gt = -9.8 \text{ м/с}^2 \times 1 \text{ с} = -9.8 \text{ м/с}$).



Далее, найдём положение мяча, т. е. найдём его координаты по осям x и y , воспользовавшись уравнением (2):

$$x = v_{0x}t;$$

$$y = v_{0y}t - \frac{1}{2}gt^2.$$

Теперь было бы неплохо исключить время из второго уравнения. Для этого нам стоит переписать первое!

$$t = \frac{x}{v_{0x}}.$$

Подставив результат во второе уравнение, получим

$$y = v_{0y}\left(\frac{x}{v_{0x}}\right) - \frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_{0x}}\right)^2.$$

Это квадратичная функция, которая при построении даёт параболу. Правда, за начальную точку здесь принята точка, из которой мяч был брошен.

С помощью данного уравнения можно узнать, где упадёт брошенный мяч. Вынесем член (x/v_{0x}) за скобки:

$$y = \frac{x}{v_{0x}}\left[v_{0y} - \frac{1}{2}\left(\frac{g}{v_{0x}}x\right)\right].$$

А так как мы знаем, что в точке падения мяча $y = 0$, а $x \neq 0$, то приравняем к нулю правую часть уравнения:

$$v_{0y} - \frac{1}{2}\left(\frac{g}{v_{0x}}\right)x = 0.$$

Решая это уравнение относительно x , мы находим расстояние, пройденное мячом по горизонтали!

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

Если мы введём угол броска θ и соответствующим образом перепишем уравнения, то сможем найти такой угол, при котором мяч с заданной начальной скоростью улетит дальше всего. Начальная скорость может быть записана следующим образом:

$$\vec{v}_0 = (v_{0x}, v_{0y}) = (v_0 \cos\theta, v_0 \sin\theta).$$

Тогда для точки падения мяча получим

$$x = \frac{2v_0^2 \cos\theta \sin\theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin(2\theta)}{g}.$$

⊕ Напомним, что $\sin(2\theta) = 2\sin\theta\cos\theta$.

Данная величина достигает максимального значения при $\sin(2\theta) = 1$. Следовательно, если бросать мяч с заданной начальной скоростью, то дальше всего он улетит при угле броска, равном 45 градусам.

НАЙДЁМ УСКОРЕНИЕ И СКОРОСТЬ

Очень часто мы имеем дело со скоростью, изменяющейся во времени. Пусть Δt — это короткий интервал времени, в течение которого можно считать скорость постоянной. Тогда мы можем получить следующее приближение:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (4)$$

Здесь Δx — это перемещение, произошедшее за время Δt . В этом уравнении чем меньше величина Δt , тем точнее приближённое значение скорости. В эксперименте Δt может иметь лишь конечную величину, поэтому мы можем получить только некое усреднённое значение скорости. Но теоретически мы можем рассмотреть случай, когда Δt стремится к нулю. Другими словами, мы можем определить скорость в любой заданный момент времени:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad \text{— это есть определение производной.} \quad (5)$$

То же самое верно и для ускорения. Пусть скорость изменяется на Δv за время Δt , в течение которого ускорение можно считать практически постоянным. Тогда ускорение a выражается следующим образом:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \quad (6)$$

Если ускорение не постоянно, можно сделать интервал времени бесконечно малым:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}. \quad (7)$$

Мы получили выражение для ускорения в определённый момент времени. Если теперь в него подставить выражение (5), то получим

$$a = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (8)$$

Таким образом, ускорение можно выразить как вторую производную от перемещения. Тогда второй закон Ньютона можно записать в виде дифференциального уравнения:

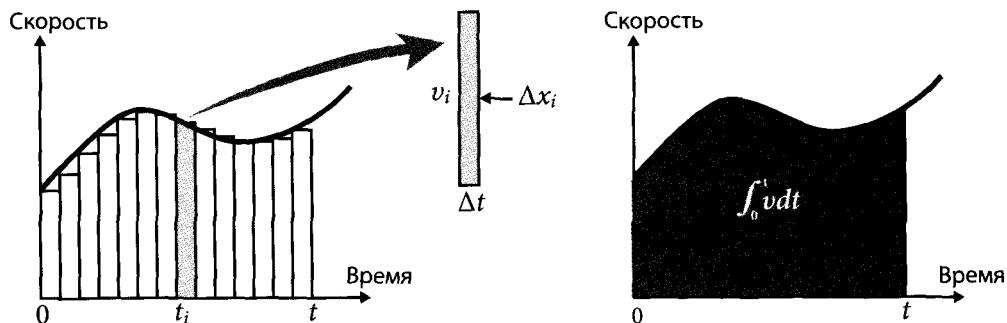
$$m \frac{dv}{dt} = F, \quad \text{или} \quad m \frac{d^2x}{dt^2} = F. \quad (9)$$

НАЙДЁМ ПРОЙДЕННОЕ ТЕЛОМ РАССТОЯНИЕ

Теперь вернёмся к пройденному телом расстоянию, когда нам известна его скорость (см. стр. 55...59). Если скорость постоянна, то из уравнения (4) мы знаем, что справедливо равенство

$$\Delta x = v \Delta t, \quad (10)$$

в котором Δx — расстояние, пройденное телом за время Δt .



В случае переменной скорости мы можем, как показано на рисунке, вычислить по формуле (10) расстояния, пройденные за каждый короткий временной интервал Δt , а затем, сложив их, приблизённо вычислить полное пройденное расстояние. Другими словами, мы делим временной интервал между точками 0 и t на n промежутков, обозначаем i -й момент времени как t_i , а скорость в этот мо-

мент времени как v_i . Обозначив как Δx_i расстояние, пройденное телом со скоростью v_i за короткий интервал времени Δt , мы получим

$$\Delta x_i = v_i \Delta t.$$

Тогда расстояние, пройденное за время t , можно приближённо рассчитать как:

$$x = v_1 \Delta t + v_2 \Delta t + \dots + v_i \Delta t + \dots + v_n \Delta t.$$

Расстояние x , пройденное за время от 0 до t , можно найти, воспользовавшись таким приближением:

$$x = \sum_{i=0}^{n-1} v_i \Delta t.$$

Если поделить основание каждого прямоугольника Δt на бесконечно малые части и взять предел суммы при $\Delta t \rightarrow 0$ (при этом n будет стремиться к бесконечности), то мы получим

$$x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{n-1} v_i \Delta t = \int_0^t v dt. \quad (11)$$

Это и есть определение интеграла. Данное равенство показывает, что можно найти расстояние, пройденное телом, вычислив интеграл, равный площади под графиком $v(t)$.

В качестве примера использования формулы (11) давайте выведем из него приведённую на стр. 87 формулу (2) для равноускоренного движения.

Пусть мы имеем равноускоренное движение с ускорением a , скоростью v_0 в момент времени $t = 0$ и скоростью v в момент времени t . Тогда из формулы (6) верно следующее:

$$a = \frac{v - v_0}{t}.$$

Из этого уравнения мы сразу получаем, что $v = v_0 + at$, т. е. соотношение (1) со стр. 87. А имея выражение для скорости как функцию времени, мы можем подставить его в соотношение

$$x = \int_0^t (v_0 + at) dt.$$

Так как v_0 и a — константы, то посчитать этот интеграл довольно просто:

$$x = \left[v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \right]_0^t.$$

Нижний предел $t = 0$, что ещё больше упрощает вычисления:

$$x = v_0 t + \frac{1}{2} at^2.$$

Только что мы получили уравнение, с которым, несомненно, уже знакомы!

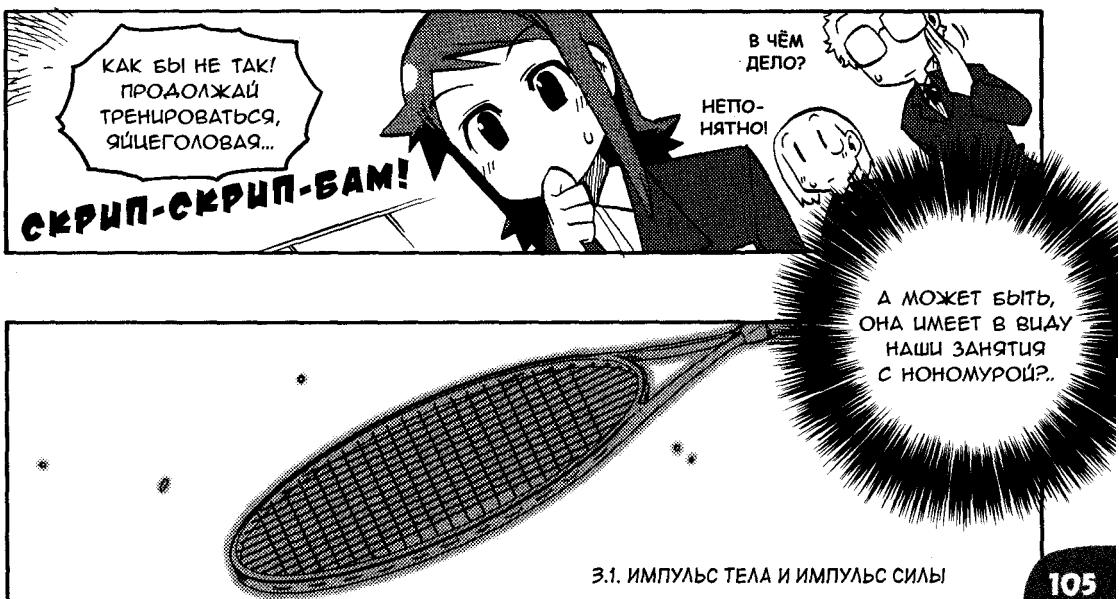


ИМПУЛЬС



3.1. ИМПУЛЬС ТЕЛА И ИМПУЛЬС СИЛЫ





ПОНЯТИЕ ИМПУЛЬСА



ДЕЛО В ТОМ, ЧТО
ДВИЖУЩИЙСЯ МЯЧ
ОБЛАДАЕТ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ,
НАЗЫВАЕМОЙ
ИМПУЛЬСОМ ТЕЛА
ЧИ ПРОСТО ИМПУЛЬСОМ.



ЭТО ОН СОЗДАЁТ
СИЛУ, ДЕЙСТВУЮЩУЮ
НА МОЮ РАКЕТКУ?

КОГДА ЛЕТИЯЩИЙ МЯЧ
УДАРЯЕТ ПО ТВОЕЙ
РАКЕТКЕ, ЕГО ИМПУЛЬС
ВОЗДЕЙСТВУЕТ
НА РАКЕТКУ

И ТАКИМ
ОБРАЗОМ
СОЗДАЁТ СИЛУ.

Б
А
М

Приложение силы

ИМПУЛЬС

ЗНАЧИТ,
В ИМПУЛЬСЕ
ПРЯЧЕТСЯ СИЛА?

ДА.
ИМПУЛЬС,
ЕГО ЕЩЁ НАЗЫВАЮТ
КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ,
ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ТАК:

$$\text{ИМПУЛЬС} = \text{МАССА} \times \text{СКОРОСТЬ}$$
$$p = mv$$

А Я ДУМАЛА, ЧТО
ДЛЯ ОПИСАНИЯ
ДВИЖЕНИЯ НАМ НУЖНА
ТОЛЬКО СКОРОСТЬ,
И ДАЖЕ
НЕ ПОДОЗРЕВАЛА,

ЧТО
НУЖНО ЕЩЁ
И НА МАССУ
УМНОЖАТЬ!

ЧТО Ж,
ДАВАЙ СРАВНИМ
МЯЧ ДЛЯ ТЕННИСА
И ШАРИК ДЛЯ
ПИНГ-ПОНГА.

ДАЖЕ ЕСЛИ
СКОРОСТИ
РАВНЫ,
ТЕННИСНЫЙ
МЯЧ...

БАМ!

ТУК!

...И ШАРИК
ДЛЯ ПИНГ-ПОНГА
ОБЛАДАЮТ
СОВЕРШЕННО РАЗ-
НЫМИ ИМПУЛЬСАМИ.

...АА, ПОПАДАНИЕ
ШАРИКОМ ДЛЯ
ПИНГ-ПОНГА
В ЧЬЮ-НИБУДЬ
ГОЛОВУ БЫЛО БЫ
НЕ ТАК БОЛЕЗНЕННО.

НУ ВОТ!

Мегуми представляет: Убийство
на теннисном корте: таинственный
ушеб на голове жертв

...осталось
забрать её
страховку.

ТЫ ВСЕ ЕЩЁ
В ОБЦАЕ НА МЕНЯ
ЗА ТОТ СЛУЧАЙ
НА КОРТЕ?

ХИ-ХИ...

НЕТ-НЕТ, ВСЁ
БЫЛО СОВСЕМ
НЕ ТАК!

Я ВСЕГО ЛИШЬ
ПЫТАЛСЯ ПОМОЧЬ
ТЕБЕ, НИНОМИЯ-САН.
ТАМ БЫЛО СЛИШКОМ
МНОГО РАБОТЫ ДЛЯ
ТЕБЯ ОДНОЙ.

ДУЕТСЯ

ДА ЧТО ТЫ,
Я ПРОСТО
ШУЧУ.

ЗНАЕШЬ,
НОНОМУРА-КУН,
ТЫ КАКОЙ-ТО
ОБЦАЧНЫЙ.

СОВСЕМ
НЕТ...

ОПЯТЬ ОНА
ЗА СВОЁ...

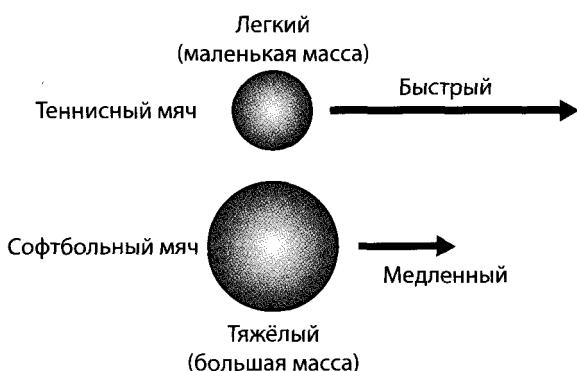
Давай обсудим!

Лаб ЗАВИСИМОСТЬ ИМПУЛЬСА ОТ МАССЫ



Так как массы теннисного мяча и шарика для пинг-понга сильно различаются, для наглядности я принёс также софтбольный мяч.

Рассмотрим импульсы медленно летящего софтбольного мяча и быстро летящего теннисного.



Постой-ка, софтбольный мяч гораздо тяжелее теннисного, верно?



Да, конечно. А вот какие соотношения обычно бывают между их массами и скоростями:

$$m_{\text{софтбольного мяча}} > m_{\text{теннисного мяча}}$$

$$v_{\text{софтбольного мяча}} < v_{\text{теннисного мяча}}$$



Однако мы не можем сказать, какой мяч обладает большим импульсом. Если помнишь, импульс можно посчитать как произведение массы и скорости ($p = mv$). Значит, нам нужны конкретные численные значения, чтобы точно определить их импульсы.



Ну, я знаю, что масса теннисного мяча около 60 г.



А софтбольного — около 180 г.



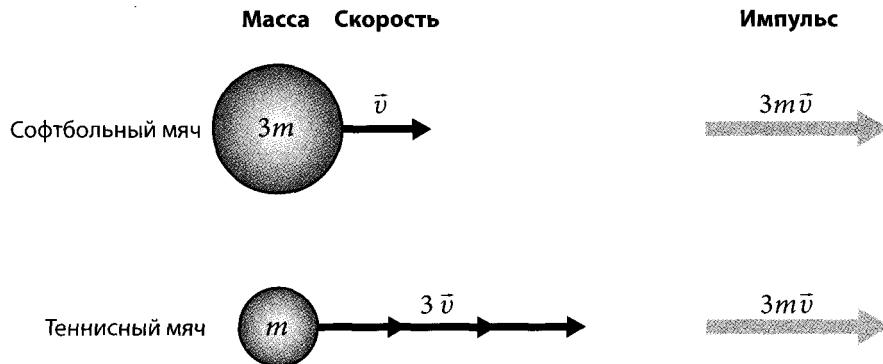
Значит, мы уже близко! 60 г и 180 г, т. е. масса софтбольного мяча в три раза больше массы теннисного мяча.



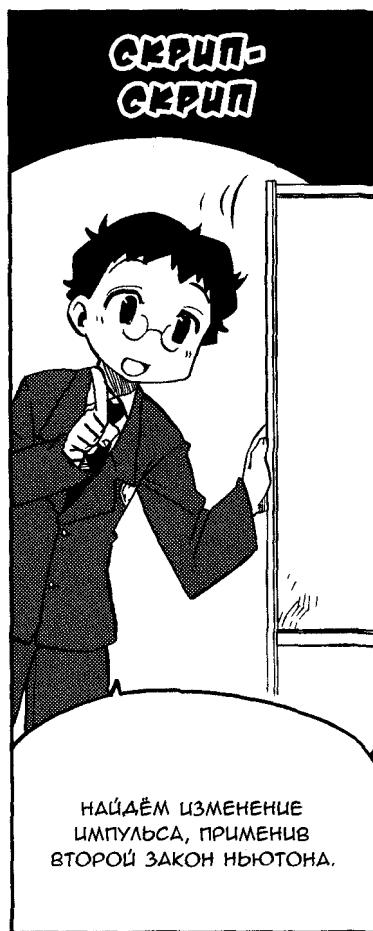
Исходя из этих данных и соотношения $p = mv$, можно заключить, что для равенства импульсов теннисный мяч должен иметь скорость, в три раза превосходящую скорость софтбольного мяча.

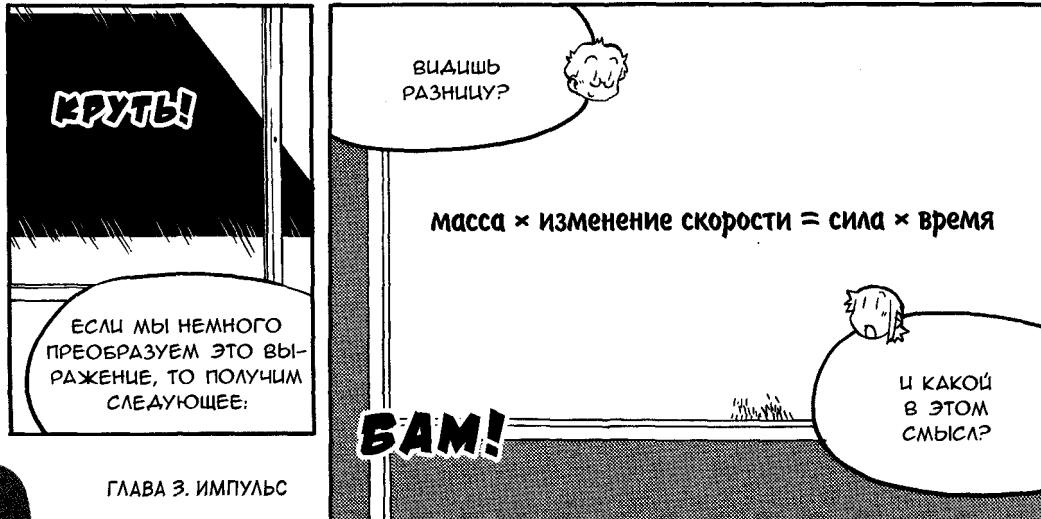


Ну, это очевидно!



ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА — ЭТО ИМПУЛЬС СИЛЫ





МЫ ЗНАЕМ,
ЧТО ИМПУЛЬС — ЭТО
МАССА, УМНОЖЕННАЯ
НА СКОРОСТЬ.

ТОГДА МАССА,
УМНОЖЕННАЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ
СКОРОСТИ, — ЭТО ПРОСТО
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТЕЛА,
ПРИ УСЛОВИИ, ЧТО ЕГО МАССА
ПОСТОЯННА.

НУ И ЧТО?

СЛЕДОВАТЕЛЬНО,
ВЫПОЛНЯЕТСЯ
СЛЕДУЮЩЕЕ
СООТНОШЕНИЕ:

изменение импульса = сила × время

ПОНЯТНО.
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА
РАВНО СИЛЕ,
ПРИЛОЖЕННОЙ К ТЕЛУ,
УМНОЖЕННОЙ НА ВРЕМЯ.

АА, СИЛА, УМНОЖЕННАЯ
НА ВРЕМЯ, НАЗЫВАЕТСЯ
ИМПУЛЬСОМ СИЛЫ.

ДРУГИМИ СЛОВАМИ,
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА
РАВНО ИМПУЛЬСУ СИЛЫ.
ИМПУЛЬС ТЕЛА ИЗМЕНЯЕТСЯ.

ЗНАЧИТ, В ТОТ КОРОТКИЙ
ИНТЕРВАЛ ВРЕМЕНИ, КОГДА
МЯЧ КОНТАКТИРУЕТ
С РАКЕТКОЙ, ВОЗНИКАЕТ
ИМПУЛЬС СИЛЫ, И ПОЭТОМУ
ИМПУЛЬС МЯЧА ИЗМЕНЯЕТСЯ.

АА,
ЭТО ТАК!

РАССМОТРИМ
СИТУАЦИЮ НА БОЛЕЕ
КОНКРЕТНОМ
ПРИМЕРЕ.

ПУСТЬ МАССА МЯЧА — m ,
СКОРОСТЬ МЯЧА ДО КОН-
ТАКТА С РАКЕТКОЙ — v_1 ,
ПОСЛЕ КОНТАКТА — v_2 .

БАМ!

Импульс до
удара:
 mv_1

СИЛА СО СТОРОНЫ
РАКЕТКИ — F ,
А ВРЕМЯ КОНТАКТА
МЯЧА И РАКЕТКИ — t .

Импульс
после удара:
 mv_2

Масса мяча: m
Скорость: $v_1 \rightarrow v_2$

Сила со стороны
ракетки: F

Длительность
контакта: t

ЭТО
ШАНС!

До удара

Момент удара

После удара

ВЫЧИСЛИМ ИМПУЛЬС
МЯЧА ДО И ПОСЛЕ
СОУДАРЕНИЯ
С РАКЕТКОЙ.

УРА!

ЭЙ, ТЫ ЕЩЁ
ЗАЕСЬ,
НИНОМИЯ-САН?

ЧТО!

КАК МЫ
ЗНАЕМ,
 $p = mv$,
ТОГДА...

ГМ...

ИМПУЛЬС МЯЧА
ДО СОУДАРЕНИЯ
С РАКЕТКОЙ
РАВЕН mv_1 .

А ПОСЛЕ СОУДАРЕНИЯ
С РАКЕТКОЙ mv_2 ...
ЗНАЧИТ, ИЗМЕНЕНИЕ
ИМПУЛЬСА РАВНО
 $mv_2 - mv_1$. ВЕРНО?

ВЕРНО!

С ДРУГОЙ СТОРОНЫ,
ИМПУЛЬС СИЛЫ
ЗАПИСЫВАЕТСЯ КАК Ft .

$$mv_2 - mv_1 = Ft$$

ВОТ ЧТО У НАС
ПОЛУЧИТСЯ...

КАК НИ КРУТИ,
ИЗМЕНЕНИЕ
ИМПУЛЬСА РАВНО
ИМПУЛЬСУ СИЛЫ.

ПО СУТИ, ДАННОЕ
ВЫРАЖЕНИЕ — НЕ ЧТО
ИНОЕ, КАК ДРУГОЙ СПОСОБ
ЗАПИСИ ВТОРОГО ЗАКОНА
НЬЮТОНА, $F = ma$.

$$ma = F$$

ВЕДЬ
ЭТОЖ
НАДО!

$$mv_2 - mv_1 = Ft$$

НО ОНО ОЧЕНЬ ПОЛЕЗНО,
КОГДА НУЖНО УЗНАТЬ
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ПОД
ДЕЙСТВИЕМ ИЗВЕСТНОЙ
СИЛЫ ИЛИ ЖЕ СИЛЫ ПРИ
ИЗВЕСТНОМ ИЗМЕНЕНИИ
ИМПУЛЬСА.

Например, если ты знаешь значения скорости мяча до и после удара, U и U' , и время соударения мяча и ракетки t ...

...то сможешь легко найти силу F , с которой ракетка действует на мяч.

О!
СЕКРЕТНОЕ
ОРУЖИЕ!!!

F

t

U'



конечно, если только ты знаешь конкретные значения скоростей и время контакта.

Необыкновенный смэш
Мегуми Ниномии!

значит... мы можем узнать даже силу, с которой бьют по мячу?

ЭТО
ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ
ОЧЕНЬ ПОЛЕЗНЫМ!

Лаб НАЙДЁМ ИМПУЛЬС ПРИ УДАРЕ



Давай проанализируем твою игру, Ниномия-сан, и найдём силу, которую ты прикладываешь к мячу при ударе. Во время твоего матча с Саякой я снял твоё движение на скоростную фотокамеру. Рассмотрим подробнее тот момент, когда ты отбиваешь её смэш.



Ну вот, опять очередная выдумка.



На этот раз я действительно вас снимал.



Зачем?



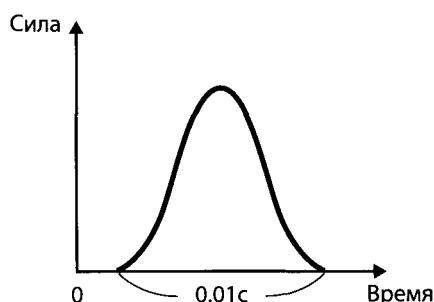
Исключительно во имя науки. Как бы то ни было, я проанализировал снимки и выяснил, что скорость мяча при ударе о ракетку была около 100 км/ч, а отбила ты его со скоростью около 80 км/ч. Также я определил время контакта мяча с твоей ракеткой — оно составило 0.01 секунды.



Значит, у нас есть все необходимые данные!



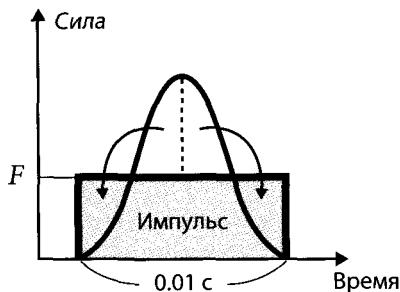
Используя эти значения, мы можем найти силу, с которой твоя ракетка действовала на мяч. Но всё не так просто. Как видно из графика, сила удара изменяется во времени.



Давай обсудим!



Однако в данном примере мы будем считать силу постоянной и равной среднему значению. Обозначим её F .



Это сильно упрощает расчёты.



Сначала рассчитаем импульс мяча до удара. Масса теннисного мяча 0.06 кг. Скорость отрицательная — -100 км/ч, если смотреть с твоей стороны. Зная, что 1 км = 1000 м, а 1 ч = 3600 с, переведём скорость в метры в секунду (м/с) по следующему правилу: 1 км/ч = 1000 м/ 3600 с. Тогда скорость мяча:

$$v = \frac{-100 \text{ км}}{1 \text{ ч}} \times \frac{1000 \text{ м}}{1} \times \frac{1}{3600 \text{ с}} = -27.8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Импульс мяча до удара = $mv = 0.06 \text{ кг} \times (-27.8) \text{ м/с} = 1.7 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$.



Теперь мы знаем начальный импульс мяча. Немного странно, что его значение отрицательно, но, я полагаю, это всего лишь означает направление относительно меня.



Рассчитаем импульс мяча после удара. Скорость мяча равна 80 км/ч, а её направление положительно, откуда получаем

$$v = \frac{80 \text{ км}}{1 \text{ ч}} \times \frac{1000 \text{ м}}{1} \times \frac{1}{3600 \text{ с}} = 22.2 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Импульс мяча после удара = $mv = 0.06 \text{ кг} \times 22.2 \text{ м/с} = 1.3 \text{ кг}\cdot\text{м/с}$.

Давай обсудим!



Знание импульса мяча до и после удара даёт нам возможность вычислить изменение импульса мяча, верно?



Да.

$$\begin{aligned}\text{Изменение импульса мяча} &= \\ &= \text{импульс мяча после удара} - \text{импульс до удара} = \\ &= 1.3 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с} - (-1.7 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}) = 3.0 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с} = \Delta p.\end{aligned}$$

Итак, мы узнали, что изменение импульса составило $3 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$. А так как сила действовала в течение 0.01 секунды, значит, подставив это время в равенство

$$\begin{aligned}\text{изменение импульса мяча} &= \\ &= \text{сила, действующая на мяч} \times \text{время действия силы},\end{aligned}$$

мы получим

$$3.0 = F \times 0.01.$$



Понятно! Разделив $3 \text{ кг}\cdot\text{м}/\text{с}$ на 0.01 с, мы узнаем, какова сила удара... Значит, получится 300 !



Да! Допишем сюда единицу силы — Н (ニュ顿).

$$F = 300 \text{ Н.}$$

Для наглядности выражим эту силу в килограмм-силах (кгс). Так как 1 кгс примерно равен 10 Н , значит, ты, отбивая мяч, приложила к нему силу около 30 кгс .



Ого! Но мне кажется, что 30 кг и поднять-то нелегко!

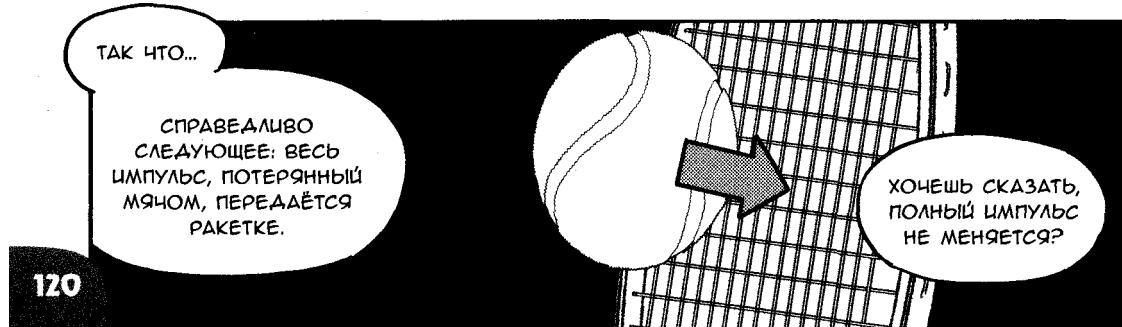
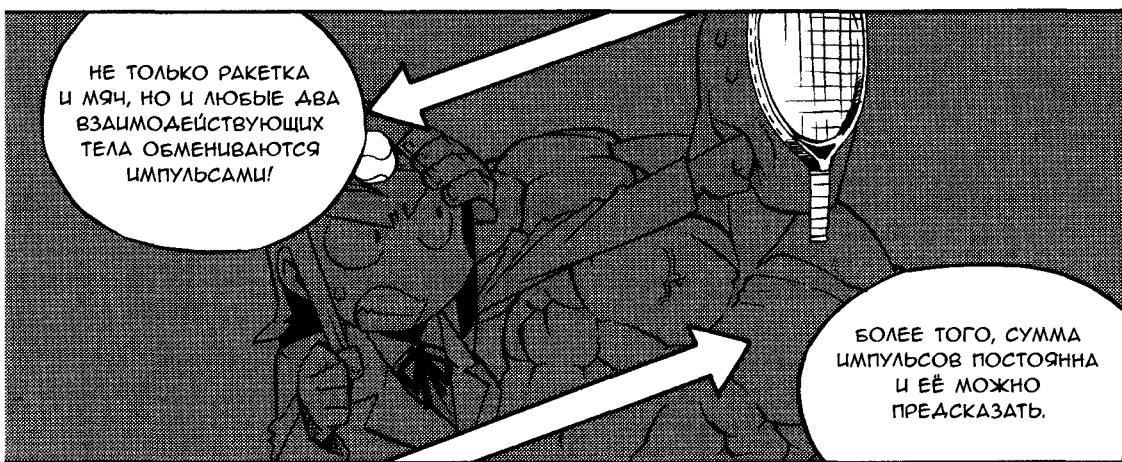


Ведь это — мгновенная сила. Мышцы используются здесь совсем по-другому, чем при поднятии груза весом 30 кг .

 **Примечание.** Килограмм-сила (кгс) — единица силы в системе МКГСС (метр — килограмм-сила — секунда). В настоящее время систему МКГСС не рекомендуют к применению.

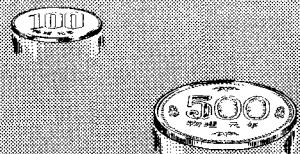
3.2. ИМПУЛЬС ТЕЛА СОХРАНЯЕТСЯ

ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА И СОХРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСА



ОБРАТИМСЯ
К ПРОСТОМУ
ПРИМЕРУ.

ВОЗЬМЁМ МОНЕТУ
100 ЦЕН
И МОНЕТУ
500 ЦЕН.



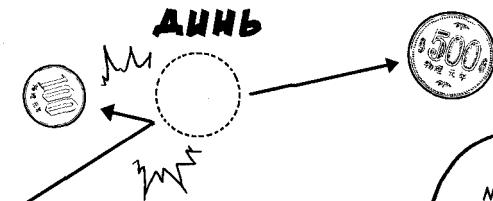
ПОСТАРАЙСЯ
ПОПАСТЬ МОНЕТОЙ
100 ЦЕН
ПО МОНЕТЕ
500 ЦЕН.

СКРЭБ-СКРЭБ-СКРЭБ

НУ...
Я ПОПРОБУЮ.

ОП!

щёлк



МОНЕТА 500 ЦЕН
ОТСКОЧИЛА ДАЛЕКО,
А МОНЕТА 100 ЦЕН
ВООБЩЕ ОТЛЕТЕЛА
НАЗАД.



ПРОИЗОШЛО
СЛЕДУЮЩЕЕ...
МОНЕТА 100 ЦЕН,
ОБЛАДАЯ ИМПУЛЬСОМ,
УДАРИЛАСЬ О МОНЕТУ
500 ЦЕН.

Сила, действующая на 500 иен со стороны 100 иен

В момент столкновения, в соответствии с законом действия и противодействия, сила, с которой монета 500 иен действует на монету 100 иен,

и сила, с которой монета 100 иен действует на монету 500 иен, равны по величине и противоположны по направлению.

Сила, действующая на 100 иен со стороны 500 иен

ВОТ
КАК!

Значит, здесь тоже применяется закон действия и противодействия.

Изменение импульса равно "СИЛА × ВРЕМЯ", поэтому если и время равно, то изменения импульса тоже равны.

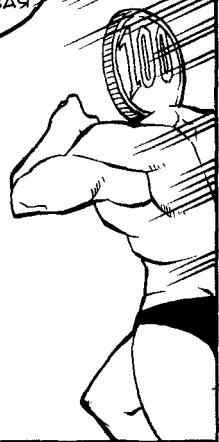
Другими словами...

выполняется равенство:
"изменение импульса монеты 100 иен + изменение импульса монеты 500 иен равно нулю".

$$\begin{array}{c} \uparrow \\ + \\ \downarrow \\ = \\ 0 \end{array}$$

ПОКА 500-ЦЕНОВАЯ МОНЕТА ПОКОИЛАСЬ, ЕЁ ИМПУЛЬС БЫЛ РАВЕН НУЛЮ. ЗАТЕМ В НЕЁ ВРЕЗАЛСЯ 100-ЦЕНОВАЯ МОНЕТА...

ТОП,
ТОП,
ТОП!



ПОКА ДЕЙСТВОВАЛИ СИЛЫ, ИМПУЛЬСЫ ОБЕИХ МОНЕТ МЕНЯЛИСЬ.

БАХ!

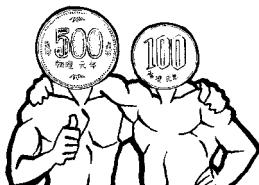
НЕ ОЧЕНЬ МИЛЯ
КАРТИНКА,
НО ЦАЕЮ
Я УЛОВИЛА.

СУММА ИМПУЛЬСОВ ОБЕИХ МОНЕТ ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ РАВНА НАЧАЛЬНОМУ ИМПУЛЬСУ МОНЕТЫ 100 ЦЕН.

ТОЧНО!

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ ЗАКОНОМ СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА.

ХА-ХА-ХА!



СОХРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСА?
ЧТО ЭТО ЗНАЧИТ?



В ФИЗИКЕ О ВЕЛИЧИНЕ, НЕ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ВО ВРЕМЕНИ, ГОВОРЯТ, ЧТО ОНА СОХРАНЯЕТСЯ.

3.2. ИМПУЛЬС ТЕЛА СОХРАНЯЕТСЯ

ДАВАЙ ВЗГЛЯНЕМ
НА ПРАВОЛО
ПО КОТОРОМУ
СОХРАНЯЕТСЯ
ИМПУЛЬС.

СПЕРВА ПОСМОТРИ
НА ЭТОТ ТЕКСТ.



$$\text{Изменение импульса монеты 100 иен} = \text{импульс монеты 100 иен после столкновения} - \text{импульс монеты 100 иен до столкновения.}$$

$$\text{Изменение импульса монеты 500 иен} = \text{импульс монеты 500 иен после столкновения} - \text{импульс монеты 500 иен до столкновения.}$$



МММ...

ПОДСТАВИВ ЭТО
В ВЫРАЖЕНИЕ
"ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА
МОНЕТЫ 100 ЦЕН +
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА
МОНЕТЫ 500 ЦЕН = 0",
ПОЛУЧИМ:



$$(\text{импульс монеты в 100 иен после столкновения} - \text{импульс монеты в 100 иен до столкновения}) + \\ + (\text{импульс монеты в 500 иен после столкновения} - \text{импульс монеты в 500 иен до столкновения}) = 0.$$



ЯСНО.

ПЕРЕПИСЫВАЯ ЭТО
ВЫРАЖЕНИЕ ЕЩЁ
РАЗ, ПОЛУЧАЕМ



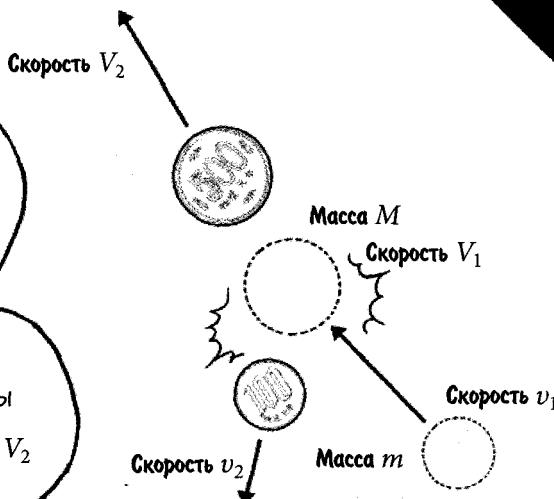
$$\text{импульс монеты 500 иен после столкновения} + \text{импульс монеты 100 иен после столкновения} = \text{импульс монеты 100 иен до столкновения} + \text{импульс монеты 500 иен до столкновения}$$



В СЛОВЕСНОЙ
ФОРМЕ
ЭТО НЕМНОГО
СЕЛИВАЕТ С ТОЛКУ.

ПОЛОЖИМ, МАССА МОНЕТЫ
100 ЦЕН = m , А МАССА
МОНЕТЫ 500 ЦЕН = M .
СКОРОСТЬ 100-ЦЕНОВОЙ
МОНЕТЫ ДО И ПОСЛЕ
СТОЛКНОВЕНИЯ ОБОЗНАЧИМ
 v_1 И v_2 ,

А СКОРОСТЬ
500-ЦЕНОВОЙ МОНЕТЫ
ДО И ПОСЛЕ
СТОЛКНОВЕНИЯ — V_1 И V_2
СООТВЕТСТВЕННО.



ТОГДА МЫ
ПОЛУЧАЕМ
СЛЕДУЮЩЕЕ
ВЫРАЖЕНИЕ:

$$mv_1 + MV_1 = mv_2 + MV_2$$

А ВОТ ЭТО
ПОНЯТНО!

ПОЛНЫЙ ИМПУЛЬС
СИСТЕМЫ ОДИНАКОВ
ДО И ПОСЛЕ
СТОЛКНОВЕНИЯ. ОН
НЕ УВЕЛИЧИЛСЯ И
НЕ УМЕНЬШИЛСЯ!

Полный
импульс

ВЕРНО.

ТАКИМ ОБРАЗОМ,
В ТЕНИ ЗАКОНА
ДЕЙСТВИЯ И
ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ...

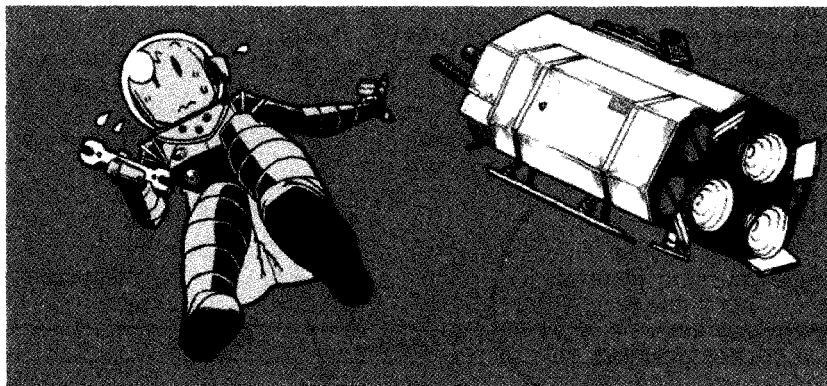
...ПРЯТАЛСЯ ЗАКОН
СОХРАНЕНИЯ
ИМПУЛЬСА.

Закон
сохра-
нения
импульса

Закон
действия
и противо-
действия

3.2. ИМПУЛЬС ТЕЛА СОХРАНЯЕТСЯ

Лаб ОТКРЫТЫЙ КОСМОС И СОХРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСА



Для нашего следующего примера сохранения импульса отправимся в открытый космос.



Что?! В космос?!



Да. Просто представь, Ниномия-сан, что ты космонавт. Во время ремонтных работ снаружи космического корабля твой соединительный трос обрывается, и ты начинаешь медленно отплывать от корабля. Всё, что у тебя есть, — это гаечный ключ, который ты использовала для ремонта. Как тебе вернуться обратно на корабль?



Может, я могу приплыть обратно? Я хорошо плаваю!



О-х-о-х-о, в вакууме тебе «приплыть» не удастся! Вспомни первый закон движения: покоящееся тело остаётся в состоянии покоя, пока на него не подействует сила. Как бы усердно ты ни двигала руками и ногами, тебе не от чего будет оттолкнуться. Ты просто будешь махать руками и продолжать плыть в том же направлении.



О нет! Плохи мои дела!

Давай обсудим!



Никогда не теряй надежду! Твои познания в физике могут спасти тебе жизнь! Помнишь, у тебя есть гаечный ключ? Брось его в противоположную от ракеты сторону. Благодаря сохранению импульса ты начнёшь двигаться к ней.



Правда? Думаешь, у меня получится?



Давай это проверим. Предположим, что до броска твоя скорость равна нулю, а значит, и импульс твоего тела равен нулю. Пусть масса гаечного ключа равна m , и ты бросаешь его со скоростью v . Массу и последующую скорость твоего тела обозначим M и V соответственно.



Ага, понятно: если тело не двигается, то его масса равна нулю.



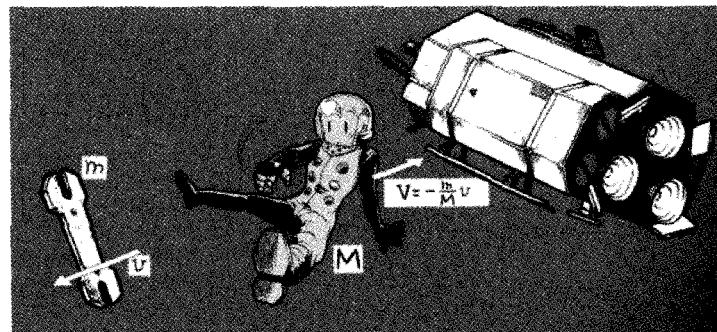
Так и есть! В соответствии с законом сохранения импульса, сумма импульсов обоих тел остаётся равной нулю даже после того, как ты бросишь гаечный ключ. Поэтому

$$mv + MV = 0.$$

Чтобы найти V , т. е. твою скорость в направлении корабля, перепишем уравнение:

$$V = (-m/M) \times v.$$

Отрицательная скорость показывает, что ты будешь двигаться в направлении, противоположном движению гаечного ключа.





Выходит, чем больше масса инструмента и больше скорость, с которой я его брошу, тем быстрее я буду двигаться, верно?



Верно. Давай перейдём к численным значениям и попробуем что-нибудь рассчитать. Пусть масса гаечного ключа — 1 кг, а твоя масса, с учётом тяжёлого скафандра, — 60 кг. Скорость ключа после броска возьмём равной 30 км/ч. Тогда получим следующее:

$$V = (-1 \text{ кг} / 60 \text{ кг}) \times 30 \text{ км/ч} = -0.5 \text{ км/ч.}$$

Это скорость твоего возвращения к кораблю.



А пусть у меня будет целый ящик с инструментами. Если я буду бросать их один за другим, я стану двигаться быстрее?



Отличная идея. Да, ты будешь двигаться всё быстрее и быстрее. Между прочим, по сути, именно так и движется ракета. Газы, выбрасываемые из её сопла, эквивалентны брошенному телу.



Вот это да! Никогда бы не подумала.



Раз за разом выбрасывая порции топлива, ракета движется в направлении, противоположном направлению выброса сгорающего топлива. Пока это продолжается, импульс ракеты возрастает и её скорость растёт. Но когда выброс топлива прекращается, ракета переходит к равномерному прямолинейному движению.

3.3. ИМПУЛЬС В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ



ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ФИКСИРОВАНО, ТЫ НЕ МОЖЕШЬ НА НЕГО ПОВЛИЯТЬ. ОДНАКО ТЫ МОЖЕШЬ СМЯГЧИТЬ УДАР, КОТОРЫЙ ПРИДЕТСЯ НА ТВОЁ ТЕЛО.

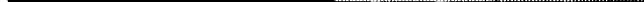
ТЫ МОЖЕШЬ ПРОДЛИТЬ КАК МОЖНО ДОЛЬШЕ ВРЕМЯ, В ТЕЧЕНИЕ КОТОРОГО НА ТЕБЯ БУДЕТ ДЕЙСТВОВАТЬ СИЛА СО СТОРОНЫ ЗЕМЛИ.

КАК ЭТО?



ИСПОЛЬЗУЯ РАВЕНСТВО
“ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА
ТЕЛА = ИМПУЛЬС СИЛЫ”,

ПОЛУЧАЕМ
“ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА
ТЕЛА = СИЛА ДЕЙСТВИЯ
СО СТОРОНЫ ЗЕМЛИ ×
× ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ”
 $m \times v = F \times t$.



ЭТО РАВЕНСТВО
МОЖНО ПЕРЕПИСАТЬ
ТАК:
 $F = mv/t$.

ОСНОДА ВИДНО,
ЧТО, ЧЕМ БОЛЬШЕ
ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ
СИЛЫ, ТЕМ
МЕНЬШЕ СИЛА F ,
ДЕЙСТВУЮЩАЯ
СО СТОРОНЫ
ЗЕМЛИ.

ДРУГИМИ
СЛОВАМИ, УДАР
МОЖНО ОСЛАБИТЬ.

ЗАРОВО!



ТЕПЕРЬ ПРЕДСТАВЬ
СЕБЕ УРОК ФИЗКУЛЬТУРЫ.
ПРИ ПРЫЖКАХ В ВЫСОТУ
ИСПОЛЬЗУЮТСЯ МЯГКИЕ
ПЕНОПЛАСТОВЫЕ МАТЫ,
ЧТОБЫ СМЯГЧИТЬ ПАДЕНИЕ,
ТАК ВЕДЬ?



АА, БЕЗ НИХ
ПРЫГАТЬ
СТРАШНОВАТО.

ОБЫЧНО МЫ ДУМАЕМ, ЧТО
МАТЫ ПОГЛОЩАЮТ УДАР,
ПОТОМУ ЧТО ОНИ "МЯГКИЕ
И ПУШИСТЫЕ".



НО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ
МЕХАНИКИ ОНИ
ПРОДЛЯЮТ ВРЕМЯ
ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ.



ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО
ФИЗИКА И ЗДЕСЬ
РАБОТАЕТ!

ДОПУСТИМ, ВРЕМЯ
ДЕЙСТВИЯ ТОРМОЗЯЩЕЙ
СИЛЫ УВЕЛИЧИЛОСЬ
ОТ 0.1 ДО 1 СЕКУНАДЫ
БЛАГОДАРЯ
ПОДЛОЖЕННОМУ МАТУ.

НО ИЗ-ЗА ЭТОГО
НЕБОЛЬШОГО ИЗМЕНЕНИЯ
НОВАЯ СИЛА СОСТАВЛЯЕТ
ЛИШЬ ОДНУ
ДЕСЯТУЮ ЧАСТЬ
ОТ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ.

МЕГУ,
НОВЫЙ
РЕКОРД!

КОШКА МОЖЕТ
БЕЗБОЛЕЗНЕННО
ПРИЗЕМЛИТЬСЯ, СПРЫГНУВ
С БОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ.
ВОЗМОЖНО, ЕЁ ГЛЯКОЕ ТЕЛО
ПОМОГАЕТ ЕЙ ПРОДЛИТЬ
ВРЕМЯ УДАРА.

ВСЁ ВЕРНО.
ИЗ-ЗА ТОГО, ЧТО КОШКА
СГИБАЕТ ЛАПЫ, ВРЕМЯ ДЕЙ-
СТВИЯ СИЛЫ НА ЕЁ ТЕЛО НЕМНО-
ГО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. Но ЭТО
ПРИВОДИТ К ТОМУ, ЧТО СИЛА
УДАРА О ЗЕМЛЮ ДОВОЛЬНО
ЗАМЕТНО УМЕНЬШАЕТСЯ.

АА, ЕСЛИ
ДУМАТЬ ТАК,
ТО МЕХАНИКА...

...ИМЕЕТ
ОТНОШЕНИЕ
К САМЫМ
РАЗНООБРАЗНЫМ
ОБЛАСТЯМ
ПОВСЕДНЕВНОЙ
ЖИЗНИ.

АГА!

КАК УСИЛИТЬ ПОДАЧУ!



А ЗНАЧИТ, Я МОГУ ПРИМЕНЯТЬ ЕЁ ПРИ ИГРЕ В ТЕННИС!

ПОНИМАЮ.

ВСПОМНИ, КАК МЫ ИЗУЧАЛИ ЗНАЧЕНИЕ ИМПУЛЬСА ПРИ УДАРЕ.

ПОМНЮ,
ПОМНЮ!

ВОТ, ОНО ЧТО!

ЕСЛИ МЫ ЗНАЕМ, ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ ИМПУЛЬС, ТО, НАВЕРНОЕ, МОЖЕМ УЗНАТЬ И СПОСОБ, КАК ЕГО УВЕЛИЧИТЬ!

СМЕРТОНОСНАЯ ПОДАЧА МЕГУМИ НИНОМИЯ, СПОСОБНАЯ РАСТИЛЮЩИЙ СЛОНА!

НУ, ЭТО УЖЕ СЛИШКОМ!

ОГО-ГО!

ХЕ-ХЕ!



Я ПРОСТО ГОВОРЮ,
ЧТО ЗДЕСЬ ЕСТЬ
НАД ЧЕМ
ПОРАБОТАТЬ. УФ!



ЗВУЧИТ
НЕТПЛОХО.

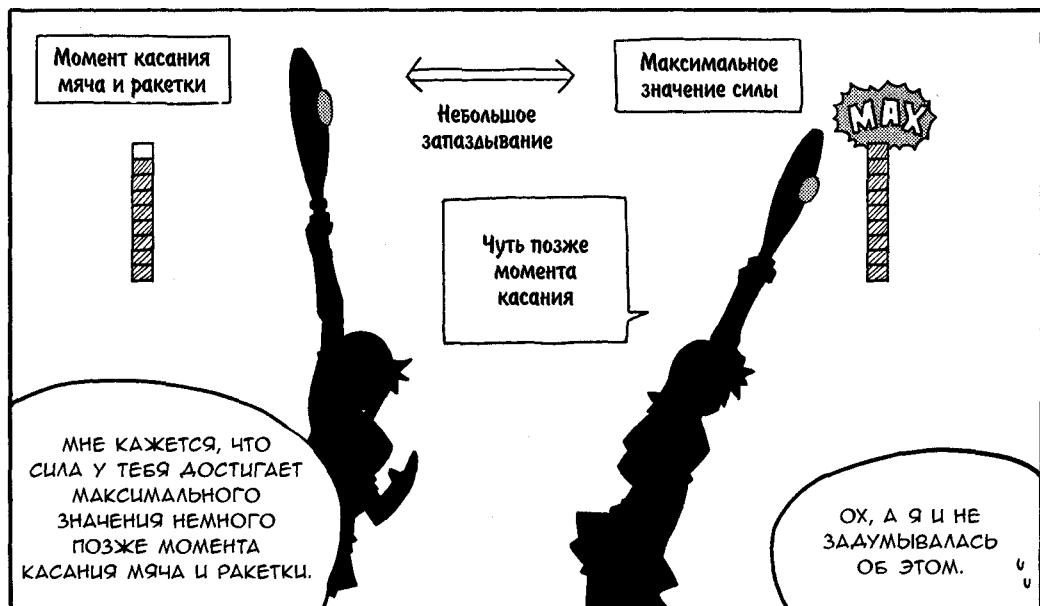
ОХ-
ОХ-
ОХ!



Я СОВЕТУЮ ПРИ УДАРЕ
КАК МОЖНО ДОЛЬШЕ
ВОЗДЕЙСТВОВАТЬ
НА МЯЧ.

НА ЧТО
Я ТРАЧУ
ВРЕМЯ?

АА, ЧАСТО ГОВОРЯТ,
ЧТО, КОГДА МЯЧ
КАСАЕТСЯ РАКЕТКИ,
НДО БЫТЬ ПО НЕМУ ТАК,
БУДО ХОЧЕШЬ ЕГО
РАЗДАВИТЬ!



ПОЭТУМУ ТЕБЕ, НАВЕРНОЕ,
СТОИТ, ИСПОЛЬЗУЯ ГИБКОСТЬ
СВОЕГО ТЕЛА, АБОЙТИСЯ
ТОГО, ЧТОБЫ СИЛА
В МОМЕНТ КАСАНИЯ БЫЛА
МАКСИМАЛЬНОЙ.



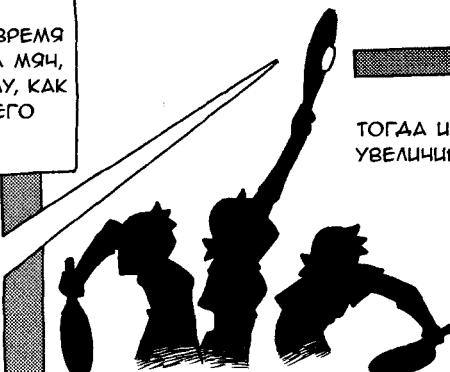
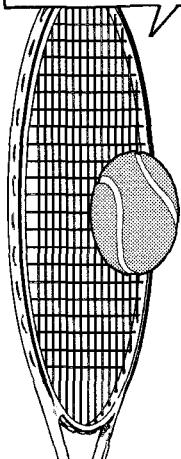
АА-А, ГИБКОСТЬ —
ЭТО ХОРОШО!

ЗНАЧИТ,
МАЛЕНЬКАЯ
ЗАДЕРЖКА
МОЖЕТ ДАТЬ
БОЛЬШОЙ
ЭФФЕКТ?!

ЧТОБЫ ПРОДЛИТЬ ВРЕМЯ
ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ НА МЯЧ,
НАДО БЫТЬ ПО НЕМУ, КАК
БУДОХХОЧЁШЬ ЕГО
РАЗДАВИТЬ!

ТОГДА ИМПУЛЬС
УВЕЛИЧИВАЕТСЯ!

ГИБКОСТЬ



КОНЕЧНО, ТЕННИС —
СЛОЖНАЯ ИГРА,
И НЕ ВСЁ МОЖНО
ТАК ПРОСТО
ОПИСАТЬ...

ОДНАКО МЯЧ
ОЛЕТАЕТ ОТ РАКЕТКИ
ПО ПРИНЦИПУ
“ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА =
= ИМПУЛЬС СИЛЫ”.
ЭТО ТОЖЕ ФАКТ!

ФЮНТЬ!

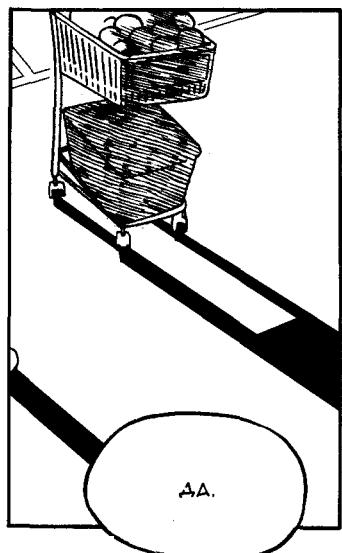
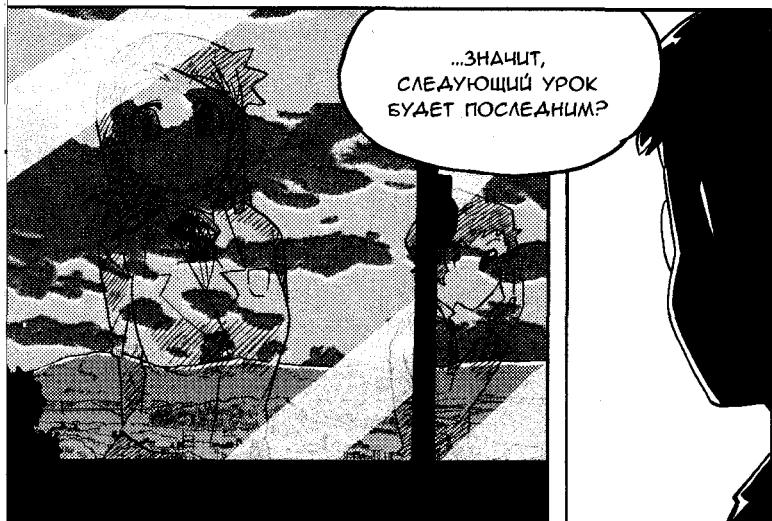
АА.

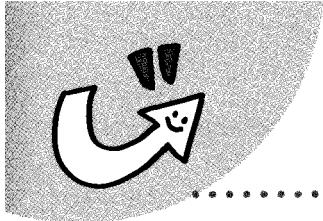
НУ, ВО ВРЕМЯ ИГРЫ
НАДО ЕЩЁ
СОСРЕДОТОЧИТЬСЯ
НА МЯЧЕ.





ПОНЯТНО,
РИОТА?
ВСЁ, РЕШЕНО!





ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!

ИМПУЛЬС ТЕЛА И ИМПУЛЬС СИЛЫ

Импульс тела, обычно называемый просто импульсом, количественно характеризует интенсивность направленного движения тела. Пусть тело массой m движется со скоростью \vec{v} и обладает импульсом \vec{p} , тогда связь между ними можно записать так:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Так как скорость — векторная величина, то и импульс — тоже векторная величина. Направления скорости тела и его импульса совпадают.

Как упоминалось в Главе 2, движущееся тело не обладает силой — оно обладает импульсом. Импульс тела меняется, если к телу приложить силу.

Представим, что мяч массой m ударяется о ракетку. Пусть его скорость до удара равна \vec{v}_1 , а после удара — \vec{v}_2 . Пусть также сила, действующая на него со стороны ракетки, равна \vec{F} .

Из второго закона Ньютона,

$$m\vec{a} = \vec{F},$$

следует, что мяч получает ускорение \vec{a} . Как правило, сила \vec{F} изменяется во времени, но в нашем случае можно считать, что она имеет постоянное среднее значение (см. стр. 118). Если \vec{F} постоянна, то постоянно и ускорение \vec{a} . Если время, в течение которого ракетка взаимодействует с мячом, обозначить t , тогда ускорение можно выразить следующим образом:

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t}.$$

Подставим это выражение для \vec{a} в формулу для второго закона Ньютона:

$$m\left(\frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t}\right) = \vec{F}.$$

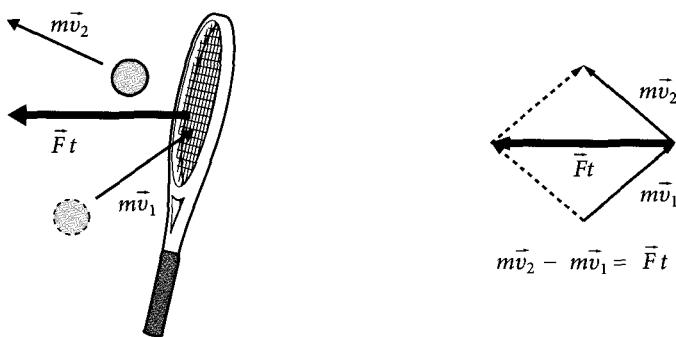
Умножив левую и правую части уравнения на t , получим

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}t.$$

Выражение $(m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1)$ представляет собой изменение импульса тела. Назвав величину $\vec{F}t$ импульсом силы, получим следующее соотношение:

изменение импульса тела = импульс силы.

Заметим, что импульсы $m\vec{v}_1$ и $m\vec{v}_2$ и импульс силы $\vec{F}t$ подчиняются правилу сложения векторов, как показано на рисунке внизу.



Вывод данного уравнения показывает, что связь между изменением импульса тела и импульсом силы является всего лишь следствием второго закона Ньютона при постоянной силе. Когда на стр. 115 утверждалось, что выражение для импульса силы — это «не что иное, как другой способ записи второго закона Ньютона», то имелось в виду именно это.

ИМПУЛЬС ТЕЛА И ИМПУЛЬС СИЛЫ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ

Как мы выяснили на стр. 129, равенство «импульс силы = изменение импульса» полезно в том случае, когда мы хотим смягчить столкновение.

Чтобы минимизировать силу, действующую на движущееся тело вплоть до его остановки, мы должны максимально увеличить время столкновения, исходя из следующего равенства:

$$\frac{\text{изменение импульса}}{\text{тела}} = \frac{\text{приложенная сила}}{\text{сила}} \times \frac{\text{время действия}}{\text{приложенной силы}}.$$

Предположим, ты прыгаешь с большой высоты и твоя скорость непосредственно перед приземлением равна v . После приземления ты находишься в состоянии покоя, значит, изменение твоего импульса равно mv . Это изменение импульса вызвано силой противодействия со стороны земли, действующей на тело, т. е. силой удара. Обозначив силу удара F , а время действия силы t , получим следующее выражение:

$$mv = Ft.$$

С увеличением t даже при одних и тех же значениях mv значение F уменьшается. Например, маты, используемые при прыжках в высоту (стр. 131), служат для того, чтобы растянуть интервал времени между началом столкновения тела

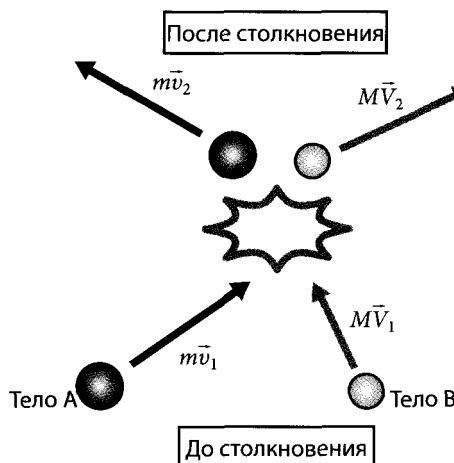
с матом и моментом, когда импульс mv станет равным нулю. Пока тело погружается в мат, прыгун испытывает действие силы F . Так как Ft постоянно, то, чем продолжительнее время t , тем меньше сила F .

В нашей жизни мы повсюду сталкиваемся с тем, что изменение импульса равно импульсу силы. Когда мы ловим мяч, мы невольно отводим руку назад.

На самом деле этим мы пытаемся уменьшить силу, продлевая время от касания мячом руки до его полной остановки. Аналогично перчатки, используемые в бейсболе и боксе, продлевают время удара и уменьшают силу. Укеми (реакция на атаку в дзюдо, заключающаяся в стратегическом падении), бамперы современных автомобилей и воздушные подушки безопасности — всё это основано на уменьшении силы удара, который возникает при изменении импульса, путём увеличения времени столкновения. По тому же принципу страховочные тросы альпинистов сделаны так, чтобы растягиваться в случае падения скалолаза и продлевать время действия силы. Помимо этого, они предохраняют скалолаза от резкого воздействия силы на поясницу. Использовать для занятий альпинизмом нерастягивающиеся верёвки вместо специальных очень опасно.

⌚ ВЫВОД ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Выведем закон сохранения импульса, исходя из того, что изменение импульса при взаимодействии двух сталкивающихся тел равно импульсу силы.



Пусть тела А и В сталкиваются друг с другом без воздействия какой-либо внешней силы, как показано на рисунке выше.

Для начала рассмотрим тело А (слева на рисунке). Положим, его масса равна m , а скорость до и после столкновения равна v_1 и v'_1 соответственно. Силу, действую-

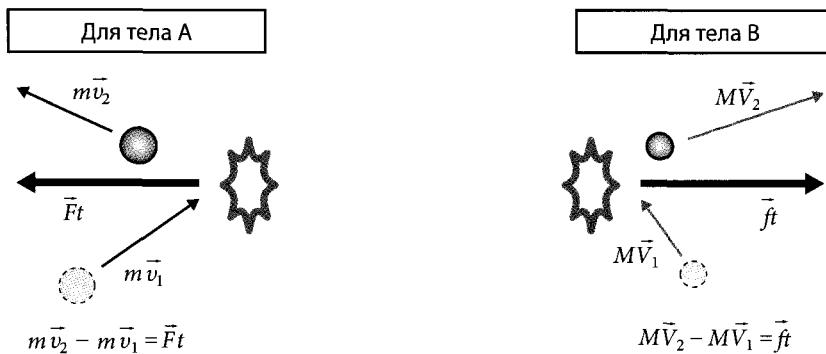
ящую на тело A со стороны тела B , обозначим \vec{F} . Тогда равенство импульса силы и изменения импульса запишется так:

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}t.$$

Здесь t обозначает время столкновения тел A и B , а сила принята равной константе. Теперь составим аналогичное равенство для тела B (справа на рисунке), зная, что изменение импульса равно импульсу силы. Пусть масса тела B равна M , скорости до и после столкновения — \vec{V}_1 и \vec{V}_2 соответственно, а сила, действующая на него со стороны тела A , равна \vec{f} , тогда

$$M\vec{V}_2 - M\vec{V}_1 = \vec{f}t.$$

Заметим, что время столкновения одинаково для обоих тел.



Используем здесь закон действия и противодействия. Так как сила \vec{f} , с которой тело A действует на тело B , численно равна и противоположна по направлению силе \vec{F} , с которой тело B действует на тело A , значит, выполняется равенство

$$\vec{f} = -\vec{F}.$$

Умножив левую и правую части этого равенства, выражающего закон действия и противодействия, на t , получим следующее соотношение:

$$\vec{f}t = -\vec{F}t.$$

Используя равенство импульса силы изменению импульса для обоих тел, получим

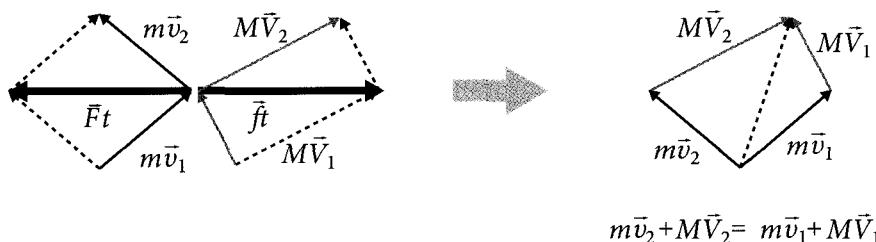
$$M\vec{V}_2 - M\vec{V}_1 = -(m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1)$$

или

$$m\vec{v}_2 + M\vec{V}_2 = m\vec{v}_1 + M\vec{V}_1.$$

❶ В случае столкновения тел, движущихся по одной прямой, знаки векторов можно опустить.

Суммарный импульс тел до столкновения должен равняться импульсу этих тел после столкновения. Это закон сохранения импульса, о котором рассказано на стр. 125.



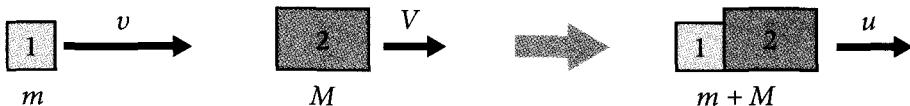
Если выразить вышеизложенное с помощью векторной схемы, то окажется, что сначала, как показано в левой части рисунка, выражения «изменение импульса = импульс силы» для обоих тел связывают друг с другом с помощью закона действия и противодействия, а затем, как показано в правой части рисунка, векторы можно переставить так, что они будут выражать равенство соответствующих сумм.

➊ РАЗДЕЛЕНИЕ И СОЕДИНЕНИЕ ТЕЛ – ЗАДАЧИ, ЛЕГКО РЕШАЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

В общем случае для решения задачи столкновения тел одного закона сохранения импульса недостаточно, однако здесь есть исключения. Это два случая: когда одно тело разделяется на два и когда два тела соединяются в одно. Задача с броском инструмента на стр. 126...128 может рассматриваться как первый случай, если считать, что Мегуми и инструмент до броска были одним телом массой $m + M$.

(В формуле на стр. 125 для упрощения не используются знаки векторов, однако в строгом смысле необходимо с помощью знаков векторов показывать, что импульсы являются векторными величинами. Правда, если рассматривается столкновение тел, движущихся по одной прямой, то знаки векторов можно и не использовать.)

Давай теперь рассмотрим задачу соединения тел.



Положим, что тело массой m и скоростью v сталкивается с телом массой M и скоростью V . Оба тела приобретают после столкновения скорость u . Так как масса после столкновения будет равна $m + M$, из закона сохранения импульса следует равенство:

$$p = (m + M)u.$$

Следовательно, приобретённая телами после столкновения скорость равна

$$u = \frac{mv + MV}{m + M}.$$

❶ ЕДИНИЦА ИМПУЛЬСА

В каких единицах измеряют импульс? Как ты помнишь, силу измеряют в ньютонах (Н), а вот у импульса нет особой единицы измерения. Однако из определения импульса: «импульс = масса \times скорость» ясно, что

$$\begin{aligned}\text{единица импульса} &= \text{единица массы} \times \text{единица скорости} = \\ &= (\text{кг}) \times (\text{м/с}) = (\text{кг}\cdot\text{м/с}).\end{aligned}$$

Таким образом, можно определять единицы измерения, используя формулы. Единицу импульса можно также выразить, используя равенство «изменение импульса = импульс силы». Так как единица изменения импульса — это то же самое, что единица импульса, значит, единица импульса тела и единица импульса силы — это одно и то же. Следовательно,

$$\begin{aligned}\text{единица импульса} &= \text{единица импульса силы} = \\ &= \text{единица силы} \times \text{единица времени} = (\text{Н}) \times (\text{с}) = (\text{Н}\cdot\text{с}).\end{aligned}$$

Кажется, что мы получили единицу, отличающуюся от первой, ($\text{кг}\cdot\text{м/с}$). Но с учётом того, что (Н) = ($\text{кг}\cdot\text{м/с}^2$), получаем

$$(\text{кг}\cdot\text{м/с}^2) \times (\text{с}) = (\text{кг}\cdot\text{м/с}).$$

Обе единицы измерения тождественны. Итак, теперь мы знаем, что единица импульса — это ($\text{кг}\cdot\text{м/с}$), или ($\text{Н}\cdot\text{с}$).

ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Закон сохранения импульса легко получить с помощью дифференциального и интегрального исчисления. Пусть v_1 и m_1 — скорость и масса тела 1, а v_2 и m_2 — тела 2. Предположим, что внешние силы на эти тела не действуют. Обозначим силу, с которой тело 1 действует на тело 2, $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$, а силу, с которой тело 2 действует на тело 1, $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$, и запишем уравнение движения для каждого тела:

$$m_1 \frac{d\vec{v}_1}{dt} = \vec{F}_{2 \rightarrow 1} \quad \text{и} \quad m_2 \frac{d\vec{v}_2}{dt} = \vec{F}_{1 \rightarrow 2}.$$

Подставим полученные равенства в выражение для закона действия и противодействия:

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1}.$$

Получим $m_2 \frac{d\vec{v}_2}{dt} = -m_1 \frac{d\vec{v}_1}{dt}$.

Так как массы постоянны, то данное выражение можно переписать следующим образом:

$$\frac{d(m_2 \vec{v}_2)}{dt} = -\frac{d(m_1 \vec{v}_1)}{dt}.$$

Перенесём всё в левую часть и объединим:

$$\frac{d}{dt} (m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2) = 0.$$

Полученное уравнение говорит о том, что сумма импульсов тел 1 и 2 ($m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$) не меняется со временем. Отсюда, проводя интегрирование, мы приходим к закону сохранения импульса:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = \text{константа}.$$

Закон сохранения импульса выводится из закона действия и противодействия и из уравнения движения. И наоборот, можно сказать, что в тени закона действия и противодействия прячется закон сохранения импульса.

Таким же способом можно получить закон сохранения импульса для трёх и более тел.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА В ВЕКТОРНОМ ВИДЕ

Так как импульс — вектор, значит, закон сохранения импульса выполняется и в векторной форме. Другими словами, сохраняется не только величина, но и направление импульса. В связи с этим в случае изменения направлений импульсов,

как в примере со столкновением монет на стр. 121, необходимо рассчитывать импульсы, разделив их на составляющие.

Рассмотрим случай столкновения тела 1 (соответствует монете 100 иен) с покившимся телом 2 (соответствует монете 500 иен), как показано на рисунке ниже.

Пусть m — масса тела 1, \vec{v}_1 и \vec{v}_2 — его скорость до и после столкновения, M — масса тела 2 и \vec{V} — его скорость после столкновения. Направим ось x вдоль вектора скорости тела 1 до столкновения и обозначим углы разлёта тел 1 и 2 после удара относительно оси x через θ и φ соответственно. Тогда можно записать:

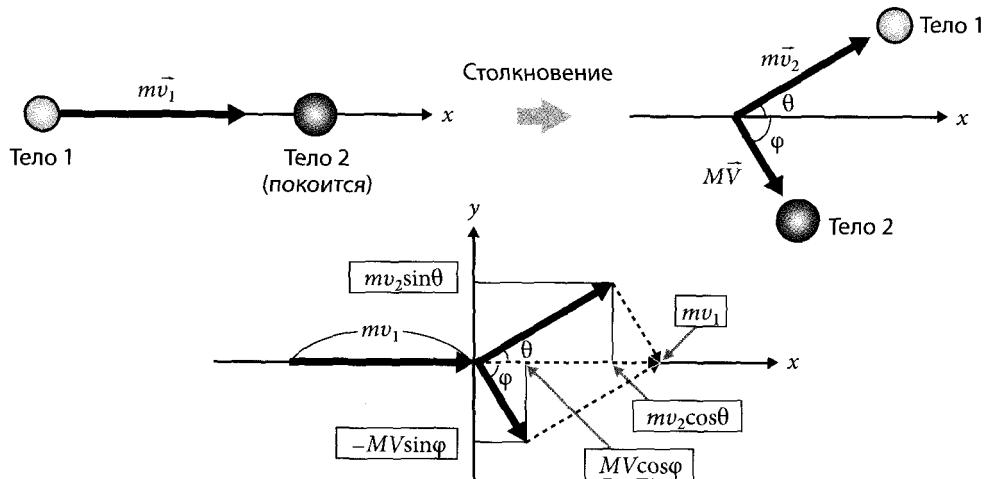
$$\vec{v}_1 = (v_1, 0), \quad \vec{v}_2 = (v_2 \cos \theta, v_2 \sin \theta), \quad \vec{V} = (V \cos \varphi, -V \sin \varphi).$$

Используя составную форму записи векторов, запишем закон сохранения импульса для составляющих:

$$\text{В направлении } x: mv_1 = mv_2 \cos \theta + MV \cos \varphi;$$

$$\text{В направлении } y: 0 = mv_2 \sin \theta - MV \sin \varphi.$$

Когда монета 100 иен сталкивается с монетой 500 иен, она часто отскакивает назад. В этом случае $\theta > 90^\circ$ и $\cos \theta < 0$. На рисунке внизу показан пример, в котором $\theta < 90^\circ$.



Но чтобы определить скорость и углы разлёта тел после столкновения, одного закона сохранения импульса нам недостаточно. Более подробно мы обсудим этот вопрос в следующей главе.

ДВИЖЕНИЕ РАКЕТЫ

На стр. 126 мы выяснили, что «плавающий» в космосе астронавт будет двигаться в направлении, противоположном брошенному им предмету. Это явление иллюстрирует тот же принцип, по которому движется ракета. Ракета ускоряется, выбрасывая с большой скоростью газы из камеры сгорания и при этом перемещаясь в противоположном им направлении. Рассмотрим это явление подробнее.



Для начала предположим, что неподвижная ракета в открытом космосе выбрасывает небольшое тело массой m со скоростью $-u$ ($u > 0$). Обозначим сумму масс ракеты и этого тела M , а скорость ракеты после выброса тела — V_1 . Исходя из закона сохранения импульса, получим следующее выражение:

$$0 = (M - m) V_1 + m (-u), \\ V_1 = \frac{m}{M - m} u. \quad (1)$$

Мы нашли скорость ракеты V_1 после выброса тела. Теперь предположим, что ракета выбрасывает ещё одно тело массой m с относительной скоростью (скоростью относительно ракеты) $-u$ в том же направлении. На этот раз, обозначив новую скорость ракеты V_2 и заметив, что масса ракеты до и после выброса второго тела равна $M - m$ и $M - 2m$, соответственно получим

$$(M - m) V_1 = (M - 2m) V_2 + m (V_1 - u).$$

Обрати внимание, что если ракета летит со скоростью V_1 , то выпущенное тело движется со скоростью $V_1 - u$. Из полученного равенства можно выразить скорость V_2 :

$$V_2 = V_1 + \frac{m}{M - 2m} u. \quad (2)$$

Если мы подставим формулу (1) в формулу (2) и избавимся от V_1 , то получим

$$V_2 = \frac{m}{M - m} u + \frac{m}{M - 2m} u = \\ = \left(\frac{1}{M - m} + \frac{1}{M - 2m} \right) mu. \quad (3)$$

(Для наблюдателя, сидящего в ракете, движущейся со скоростью V_{N-1} , небольшое тело окажется выброшенным назад со скоростью $-u$.)

Пусть ракета продолжила выбрасывать небольшие тела массой m с относительной скоростью «минус» u .

Обозначим скорость ракеты после выброса n небольших тел как V_N , тогда закон сохранения импульса запишется так:

$$[M - (N-1)m]V_{N-1} = (M - Nm)V_N + m(V_{N-1} - u).$$

Отсюда для V_N получаем

$$V_N = V_{N-1} + \frac{m}{M - Nm} u.$$



Многократно воспользовавшись этим выражением, мы получим

$$V_N = \left(\frac{1}{M-m} + \dots + \frac{1}{M-Nm} \right) mu = \sum_{k=1}^N \frac{m}{M-km} u. \quad (4)$$

В реальности ракета выбрасывает газы непрерывно, поэтому преобразуем выражение (4) для непрерывного случая. Пусть ракета через короткие промежутки времени Δt выбрасывает с относительной скоростью $-u$ небольшие массы газа Δm . Обозначим t время, за которое ракета, первоначально бывшая неподвижной, произвела N выбросов, тогда $t = N \Delta t$. Пусть $V(t)$ — функция скорости ракеты от времени, тогда заменим в выражении (4) m на Δm и V_n на $V(t)$:

$$V(t) = \sum_{k=1}^N \frac{\Delta m}{M - (\Delta m/\Delta t)(k\Delta t)} u. \quad (5)$$

В пределе при бесконечном уменьшении интервалов Δt ($\Delta t \rightarrow 0$) полученную сумму можно заменить интегралом. Чтобы перейти к интегралу, нужно произвести следующие замены: N на ∞ , а $\Delta m/\Delta t$ на dm/dt (масса, теряемая в единицу времени, т. е. масса сгораемого топлива). Заменив также Δm на $(dm/dt)dt$, получим

$$\begin{aligned} V(t) &= u \int_0^t \frac{1}{M - (dm/dt)t} \left(\frac{dm}{dt} \right) dt = \\ &= u \int_0^t \frac{1}{M(dm/dt)^{-1} - t} dt. \end{aligned} \quad (6)$$

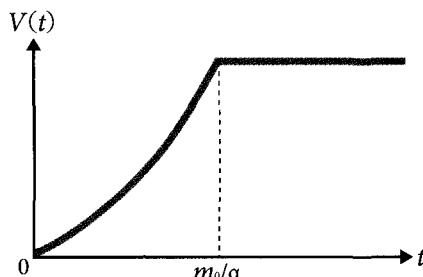
Если выброс топлива в единицу времени — постоянная величина, то, приняв

$$\frac{dm}{dt} = \alpha \text{ (константа),}$$

можно проинтегрировать уравнение (6) следующим образом:

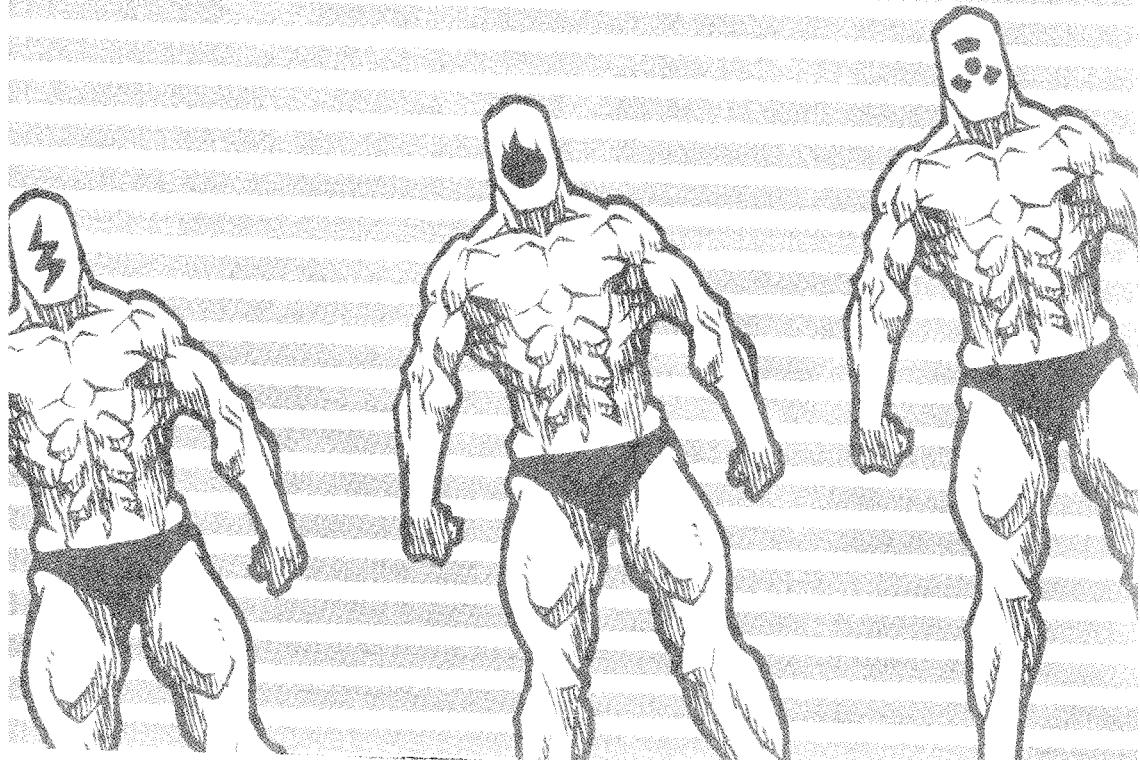
$$\begin{aligned} V(t) &= u \int_0^t \frac{1}{(M/\alpha) - t} dt = u \left[-\ln \left(\frac{M}{\alpha} - t \right) \right]_0^t = \\ &= u \ln \left(\frac{M}{M - \alpha t} \right). \end{aligned} \tag{7}$$

Выражение (7) описывает скорость ракеты в случае, когда начальная скорость $V(0) = 0$. Заметим, что αt — это полная масса топлива, использованного ракетой за время t . Следовательно, если начальная масса топлива в ракете равна m_0 , то ракета израсходует всё топливо через время $t = m_0/\alpha$ и перейдёт от равноускоренного движения к равномерному и прямолинейному (как показано на графике ниже).



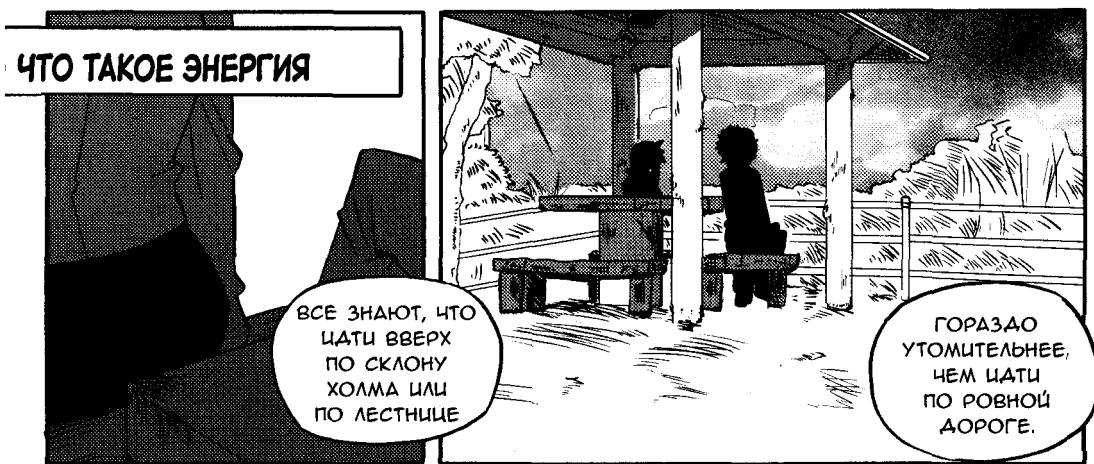
4

ЭНЕРГИЯ



Ч.1. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ







С ТЕРМИНОМ "ЭНЕРГИЯ"
МЫ ВСТРЕЧАЕМСЯ
ПОВСЮДУ, НЕ ТАК ЛИ?



ДА! НАПРИМЕР,
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ
АВТОМОБИЛИ,
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
НАПИТКИ...



ОДАКО СЛОВО "ЭНЕРГИЯ",
КАК И СЛОВО "СИЛА",
ЛЮДИ ИСПОЛЬЗУЮТ
В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ
В ЗНАЧЕНИИ, ОТЛИЧНОМ ОТ
ЕГО СМЫСЛА В ФИЗИКЕ.

ПОДОЖДИ!
ТЫ ХОЧЕШЬ
СКАЗАТЬ...



ЧТО В ФИЗИКЕ
ДЛЯ ЭНЕРГИИ ТОЖЕ
ЕСТЬ КОНКРЕТНОЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ?



ДА.

КАК И СИЛА,
ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ
ЧЕРЕЗ ЗАКОНЫ
ДВИЖЕНИЯ,

ЭНЕРГИЯ В ФИЗИКЕ
ТОЖЕ ИМЕЕТ ТОЧНОЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ.

ГЛОТЬ-ГЛОТЬ
ФЫРК

КАЖЕТСЯ, ПРИПОМИНАЮ, Я РАНЬШЕ УЖЕ СЛЫШАЛА ТЕРМИНЫ "КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ" И "ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ"

АВИЖУЩЕСЯ ТЕЛО ОБЛАДАЕТ ЭНЕРГИЕЙ, КОТОРУЮ НАЗЫВАЮТ КИНЕТИЧЕСКОЙ. ОНА ХАРАКТЕРИЗУЕТ ИНТЕНСИВНОСТЬ АВИЖЕНИЯ.

ПОХОЖЕ НА ИМПУЛЬС. Но ведь кинетическая энергия — это что-то другое, да?

УГО-ШАЙС!

сп... сп... спасибо!

ДА, НАРЯДУ С ЗАКОНОМ СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА, СУЩЕСТВУЕТ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.

ЗНАЧИТ, ЭНЕРГИЯ ТОЖЕ СОХРАНЯЕТСЯ?

ДА, НО В РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ. КРОМЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ, СУЩЕСТВУЮТ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ (ИЛИ ЭНЕРГИЯ ПОЛОЖЕНИЯ)...

...ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ, ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ...

...ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИЯ, И МНОГО ДРУГИХ ФОРМ.

ТЕБЕ НЕ НРАВИТСЯ?

НО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФИЗИКИ ЭТО ОДНА И ТА ЖЕ ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА.

Ба-а-а-м!

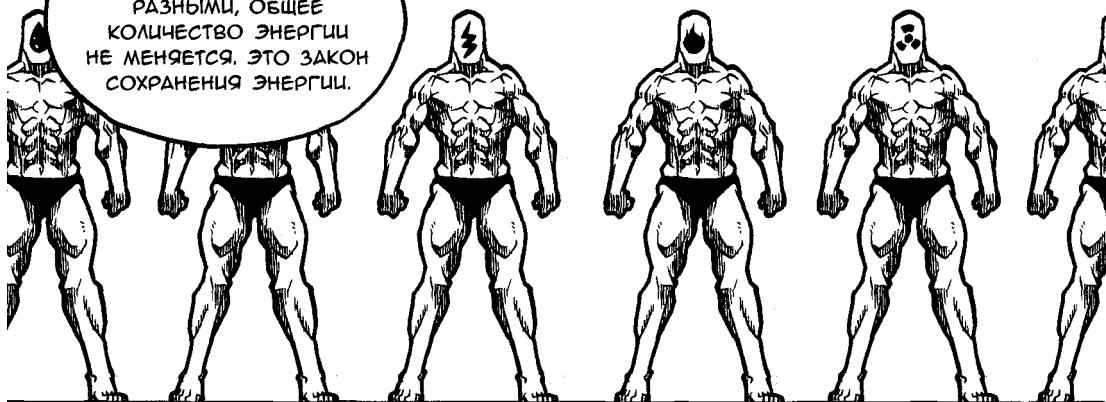
ЭНЕРГИЯ,
СУЩЕСТВУЮЩАЯ
В САМЫХ
РАЗНООБРАЗНЫХ
ФОРМАХ,

МОЖЕТ
ПЕРЕХОДИТЬ
ИЗ ОДНОЙ ФОРМЫ
В ДРУГУЮ.

ЗНАЧИТ,
ЭНЕРГИЯ ОДНА,
А ФОРМ МНОГО.
ТАК ЧТО ЛИ?

И ХОТЯ ЭТИ ФОРМЫ
МОГУТ БЫТЬ ОЧЕНЬ
РАЗНЫМИ, ОБЩЕЕ
КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ
НЕ МЕНЯЕТСЯ. ЭТО ЗАКОН
СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.

Общее количество энергии постоянно



Рассмотрим,
например, такое
устройство, как

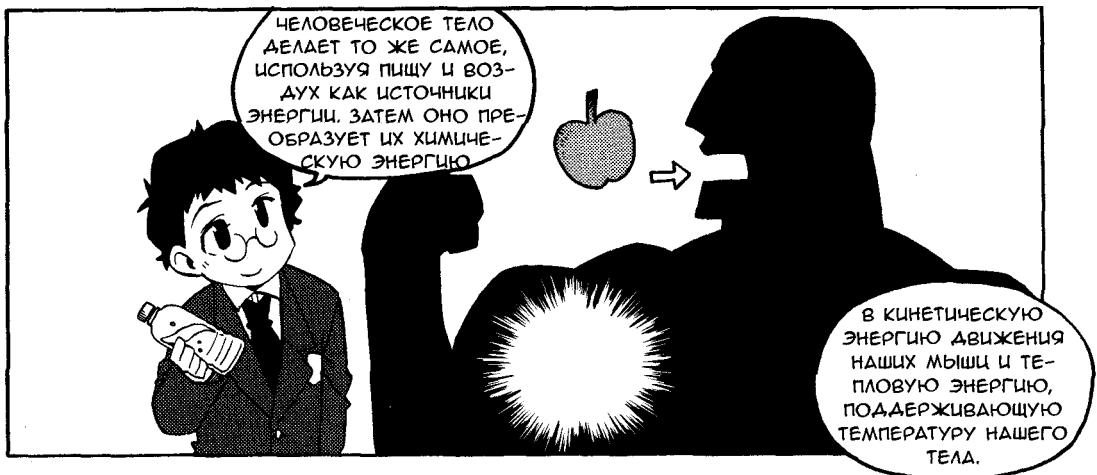
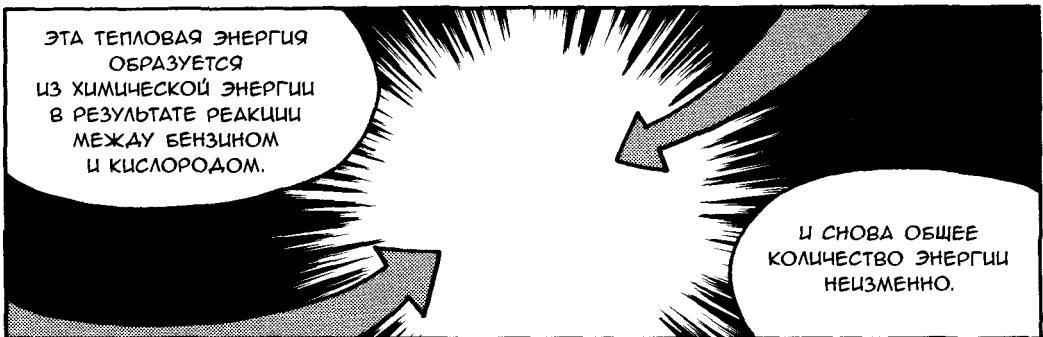
передняя фара
на велосипеде.

ЭТО УСТРОЙСТВО,
ПРЕОБРАЗУЮЩЕЕ ЧАСТЬ
КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
ВЕЛОСИПЕДА СНАЧАЛА
В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ
ЭНЕРГИЮ, А ПОТОМ —
В ЭНЕРГИЮ СВЕТА.

О, ДА!
Я ПОНЯЛА!

АЗЫНЬ

АЗЫНЬ



ЗНАЧИТ, ДАЖЕ ВНУТРИ НАШИХ ТЕЛ ЭНЕРГИЯ ПЕРЕХОДИТ ИЗ ОДНОЙ ФОРМЫ В ДРУГУЮ.

НАДО ЖЕ!

НАМ ЧАСТО КАЖЕТСЯ, ЧТО МЫ ПОТРАТИЛИ ЭНЕРГИЮ...

НО НА САМОМ ДЕЛЕ ОНА ПРОСТО ПЕРЕШЛА В ДРУГУЮ ФОРМУ, А ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ СОХРАНИЛОСЬ.

ЭНЕРГИЯ ПОСТОЯННО ЦИРКУЛИРУЕТ ПРИ НЕИЗМЕННОМ ОБЩЕМ КОЛИЧЕСТВЕ.

ЕСТЬ МНОГО ВИДОВ ЭНЕРГИИ, НО СЕЙЧАС МЫ РАССМОТРИМ...

...КИНЕТИЧЕСКУЮ И ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ, ТО ЕСТЬ МЕХАНИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ.



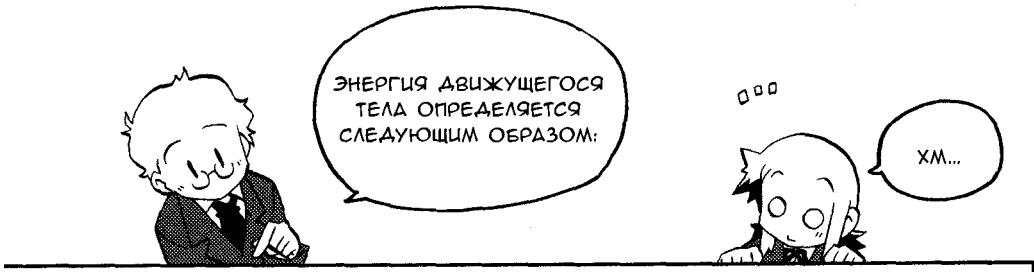
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ?

О НЕЙ МЫ...

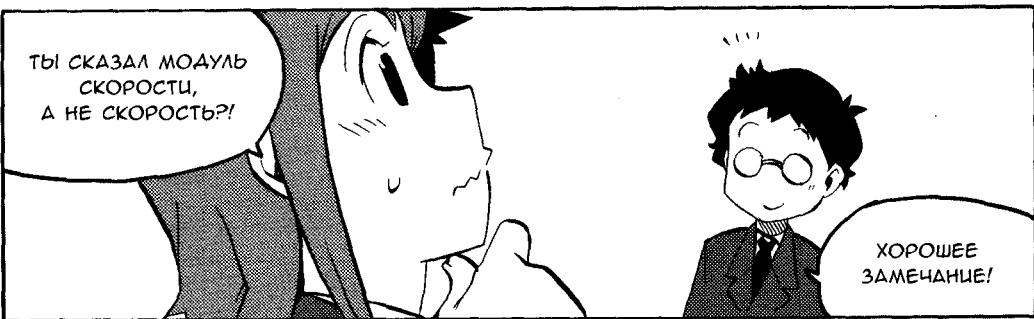
...ПОГОВОРИМ ПОЗЖЕ.

НАЧНЁМ С КИНЕТИЧЕСКОЙ.

ЛАДНО!



КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ = $1/2 \times$ МАССА \times МОДУЛЬ СКОРОСТИ \times МОДУЛЬ СКОРОСТИ



ИМПУЛЬС —
ВЕКТОРНАЯ ВЕЛИЧИНА,
ХАРАКТЕРИЗУЮЩАЯСЯ
КАК ЧИСЛЕННЫМ
ЗНАЧЕНИЕМ, ТАК
И НАПРАВЛЕНИЕМ.

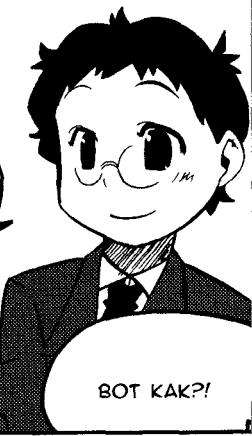
КУВЫРК



ПОНЯТНО.
ТО ЕСТЬ
У КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ НЕТ
НАПРАВЛЕНИЯ.

К ТОМУ ЖЕ, ДАЖЕ
ЕСЛИ ИМПУЛЬСЫ
ДВУХ ТЕЛ РАВНЫ,

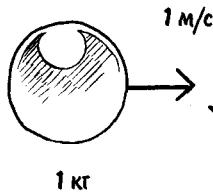
ИХ КИНЕТИЧЕСКИЕ
ЭНЕРГИИ МОГУТ
ОТЛИЧАТЬСЯ!



ВОТ КАК?!

НАПРИМЕР, СРАВНИ ИМПУЛЬС
ТЕЛА МАССОЙ 1 КГ
И СКОРОСТЬЮ 1 М/С...

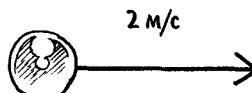
...С ИМПУЛЬСОМ ТЕЛА
МАССОЙ 0.5 КГ
И СКОРОСТЬЮ 2 М/С.
ИХ ИМПУЛЬСЫ ОДИНАКОВЫ
И РАВНЫ 1 КГ · М/С.



$$\text{Импульс} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$
$$\text{КЭ} = 0.5 \text{ Дж.}$$

НО ВОТ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ
(КЭ) ПЕРВОГО ТЕЛА РАВНА

$$1/2 \times 1 \text{ кг} \times (1 \text{ м/с})^2 = 0.5 \text{ Дж.}$$



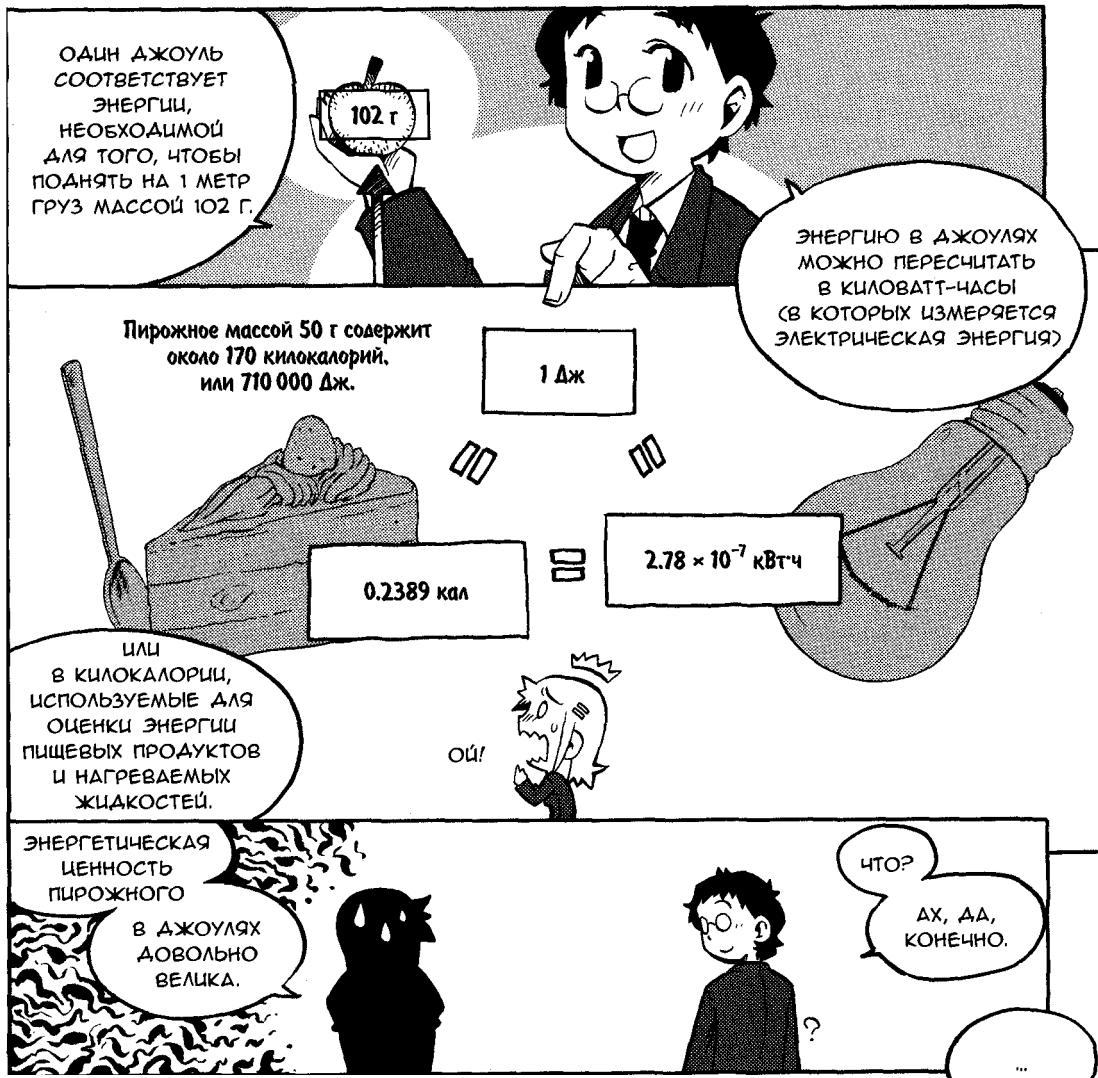
0.5 кг

$$\text{Импульс} = 1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$$
$$\text{КЭ} = 1 \text{ Дж.}$$

В ТО ВРЕМЯ КАК ЭНЕРГИЯ
ВТОРОГО ТЕЛА РАВНА

$$1/2 \times 0.5 \text{ кг} \times (2 \text{ м/с})^2 = 1 \text{ Дж.}$$





Лаб В ЧЁМ РАЗНИЦА МЕЖДУ ИМПУЛЬСОМ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ?



Разницу между импульсом и кинетической энергией легко понять, если рассматривать одновременно несколько тел.



Да?



Вспомним ситуацию, когда ты оказалась снаружи космического корабля (см. стр. 126). Чтобы вернуться к космическому кораблю, ты, используя закон сохранения импульса, бросила инструмент массой m со скоростью v , благодаря чему приобрела импульс «минус» MV , не так ли? Помнишь, мы использовали уравнение $p = mv$ для выражения связи между импульсом, массой и скоростью?



Конечно, я помню.



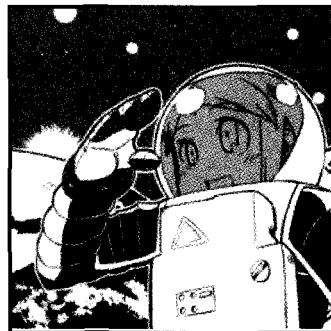
До того как ты бросила инструмент, импульсы обоих тел были равны 0. После броска, исходя из закона сохранения импульса, получаем

$$\begin{aligned} \text{сумма импульсов инструмента и астронавта} &= \\ &= mv + MV = 0. \end{aligned}$$

Отсюда мы видим, что $mv = -MV$. Другими словами, импульс инструмента (mv) и импульс твоего тела (MV) равны по величине и противоположны по направлению. В сумме они дают ноль.



Это понятно. Раз импульс — это вектор, то у него есть направление! Поэтому два импульса, равные по величине, но противоположно направленные, скомпенсируют друг друга.





Однако после броска появляется кинетическая энергия ключа и энергия движущегося космонавта, сумма которых нулю не равна:

$$KE \text{ ключа} + KE \text{ космонавта} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}MV^2 > 0.$$



Да, я смогла двигаться, потому что образовалась кинетическая энергия.



Эта кинетическая энергия появилась, когда ты бросила инструмент. А согласно закону сохранения энергии энергия твоего тела уменьшится ровно на величину кинетической энергии, которую получил брошенный инструмент.



Ну, хорошо.



Непосредственно измерить энергию организма сложно, но мы можем определить энергию, переданную или полученную организмом от другого тела.



Другими словами, можно считать, что я потеряла ровно столько энергии, сколько передала ключу, который я бросила?



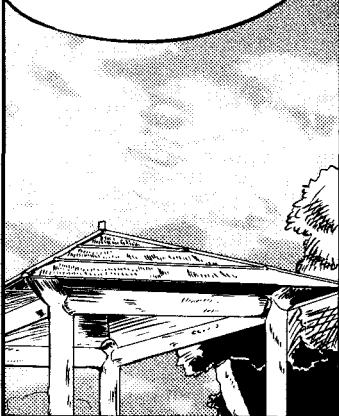
Да. И в основе этого тоже лежит закон сохранения энергии. Теперь ты, наверное, понимаешь, почему такие величины, как энергия и импульс, необходимо рассматривать отдельно друг от друга.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ (ЭНЕРГИЯ ПОЛОЖЕНИЯ)

РАНЕЕ Я УПОМЯНУЛ, ЧТО МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ МОЖЕТ БЫТЬ КИНЕТИЧЕСКОЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ — ЭТО ЭНЕРГИЯ ПОЛОЖЕНИЯ.

ВОТ КАК?



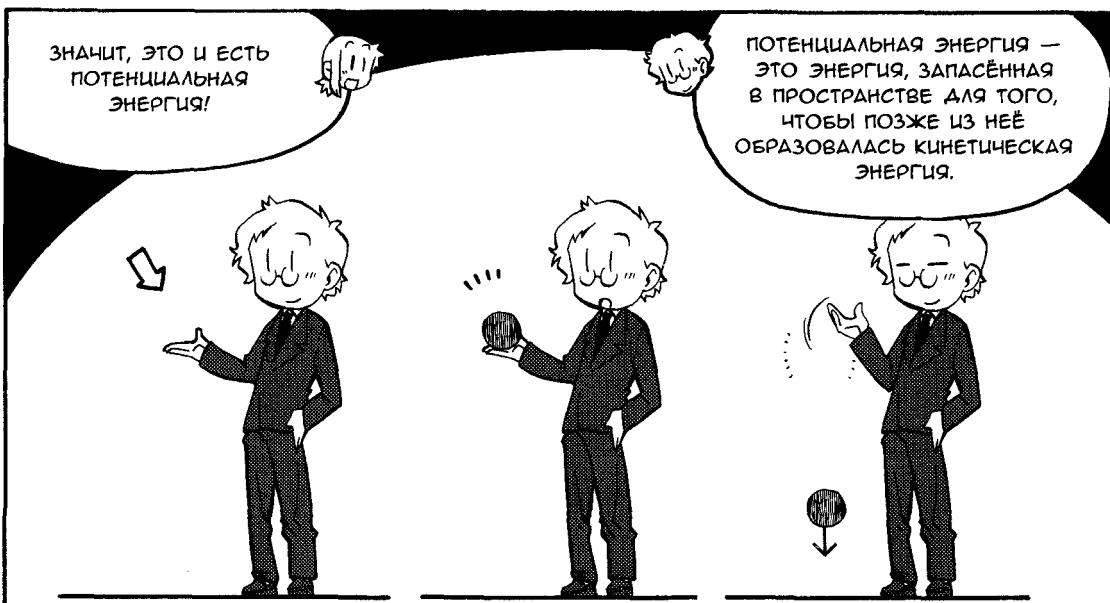
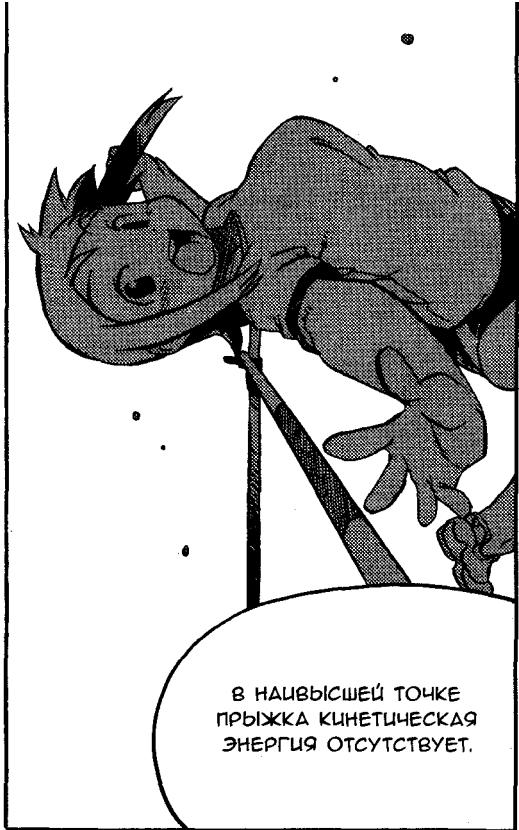
ДА.

СЛОВО "ПОТЕНЦИАЛ" ОЗНАЧАЕТ "СКРЫТУЮ СПОСОБНОСТЬ".

Potential

ТО ЕСТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ОЗНАЧАЕТ СКРЫТУЮ ЭНЕРГИЮ?

ДАВАЙ В КАЧЕСТВЕ ПРИМЕРА РАССМОТРИМ ПРЫЖКИ В ВЫСОТУ С РАЗБЕГА.



Когда Риот берёт в руку предмет, то на этой высоте он запасает в нём потенциальную энергию.

Теперь предмет в руке Риоты обладает только потенциальной энергией.

Когда предмет падает, его потенциальная энергия уменьшается, преобразуясь в кинетическую.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ, КОТОРУЮ МЫ СЕЙЧАС РАССМОТРЕЛИ, ВОЗНИКАЕТ БЛАГОДАРЯ ЗЕМНОЙ ГРАВИТАЦИИ, ПОЭТОМУ...

... ЕЁ НАЗЫВАЮТ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ.

ТЫ ХОЧЕШЬ СКАЗАТЬ, ЧТО ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СУЩЕСТВУЕТ НЕ ТОЛЬКО В СЛУЧАЕ ПАДЕНИЯ ТЕЛА?

АА. НАПРИМЕР, ВОТ РЕЗИНКА И ПРУЖИНА, КОТОРЫЕ МОГУТ РАСТЯГИВАТЬСЯ И СЖИМАТЬСЯ...

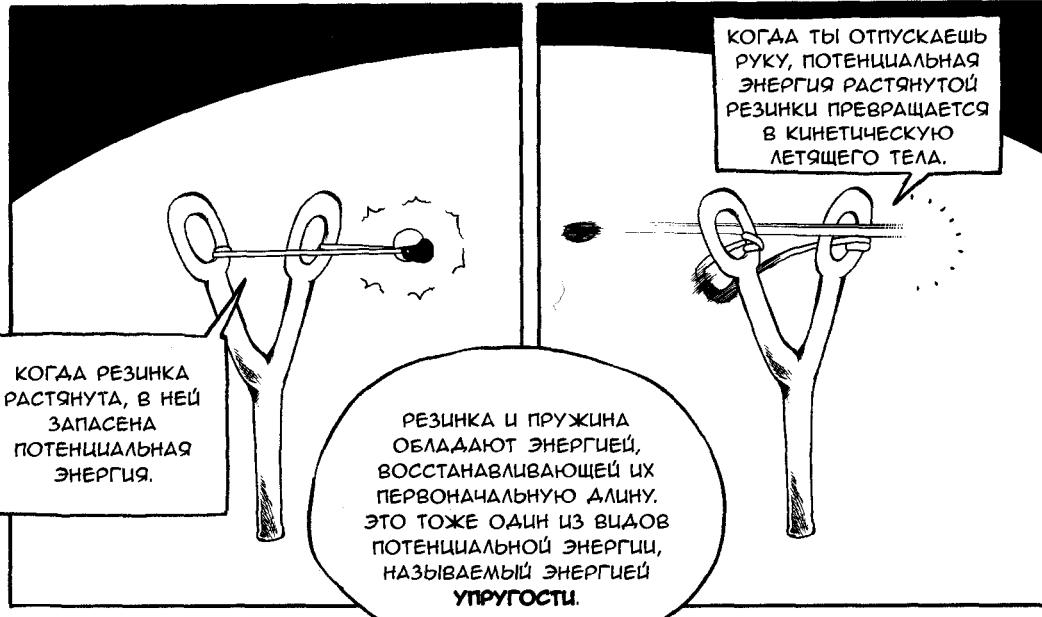
ГЛЯНЬ!



.....

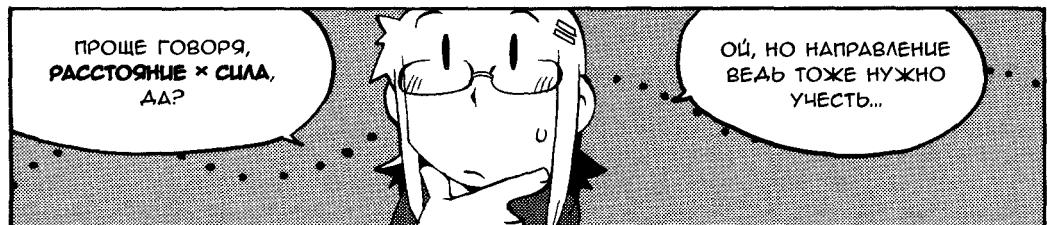
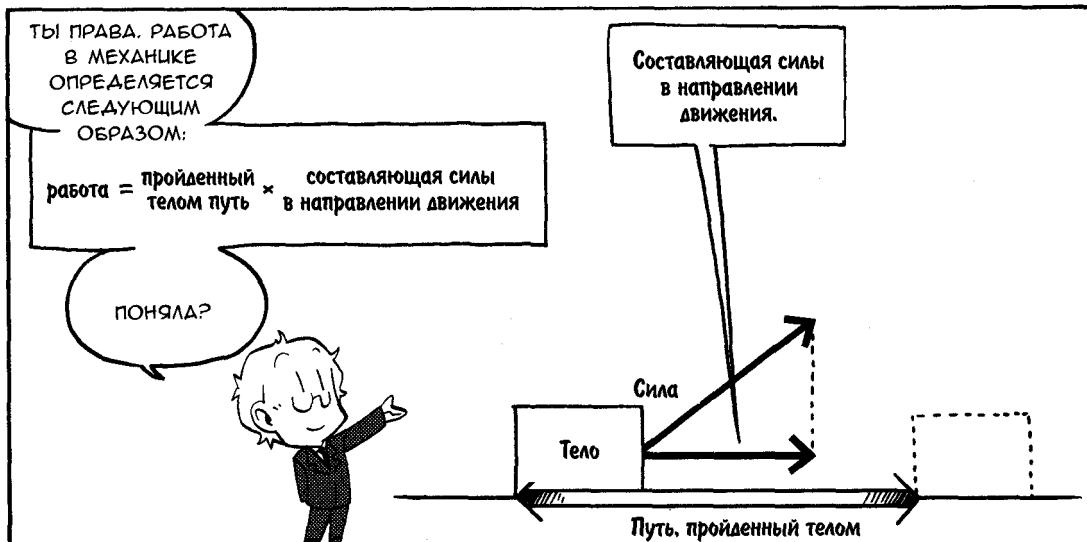
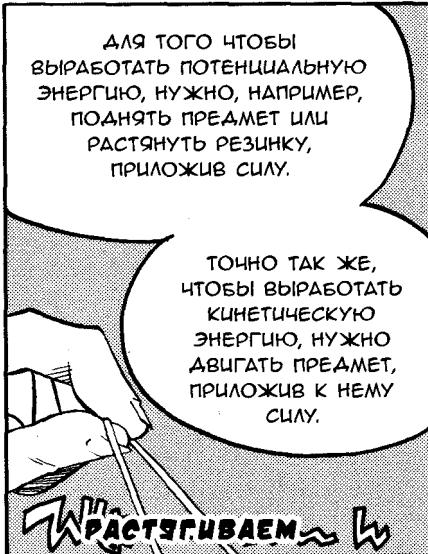
.....

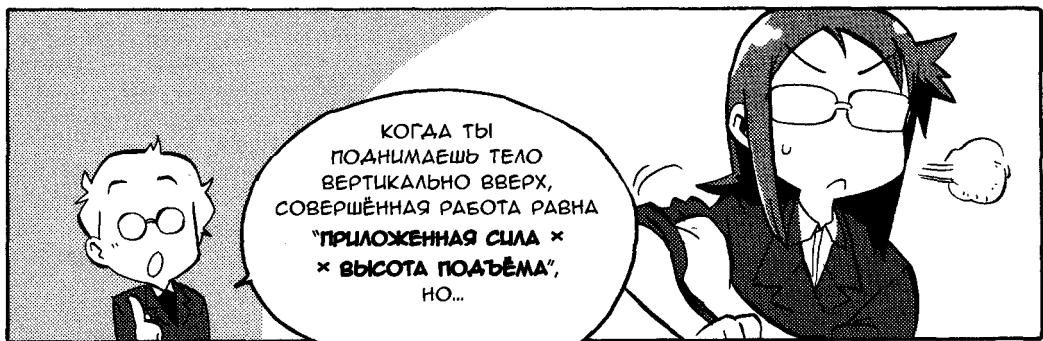
АА, У ТЕБЯ ПРО ЗАПАС ПОЛНО ВСИХ ШТУКОВИН...



КОГДА РЕЗИНКА РАСТЯНУТА, В НЕЙ ЗАПАСЕНА ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.

РЕЗИНКА И ПРУЖИНА ОБЛАДАЮТ ЭНЕРГИЕЙ, ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ ИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНУЮ АЛИНУ. ЭТО ТОЖЕ ОДИН ИЗ ВИДОВ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, НАЗЫВАЕМЫЙ ЭНЕРГИЕЙ УПРУГОСТИ.





РАБОТА И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

ИТАК, ТЫ МОЖЕШЬ УВЕЛИЧИТЬ ИЛИ УМЕНЬШИТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ, СОВЕРШИВ РАБОТУ.



ВЕРНЁМСЯ ЕЩЁ РАЗ К ПОДНЯТОЙ СУМКЕ.

Сила со стороны руки
(уравновешивающая силу тяжести)
×
высота, на которую поднято тело

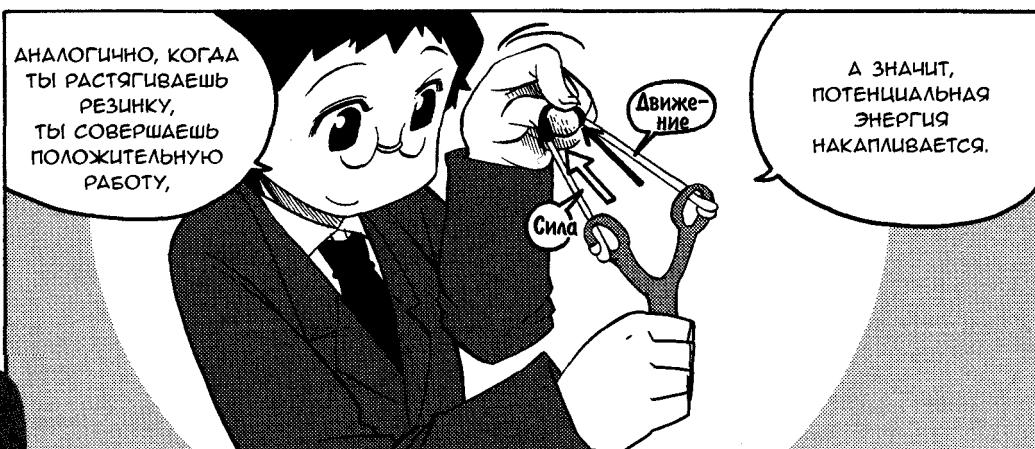
ВОТ ТАКАЯ РАБОТА БЫЛА СОВЕРШЕНА НАД СУМКОЙ.

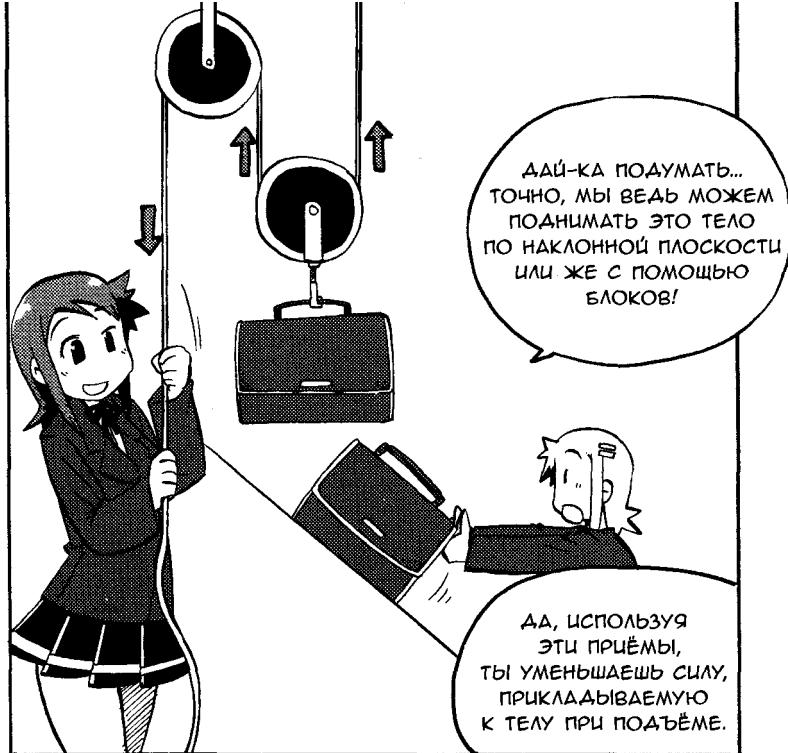
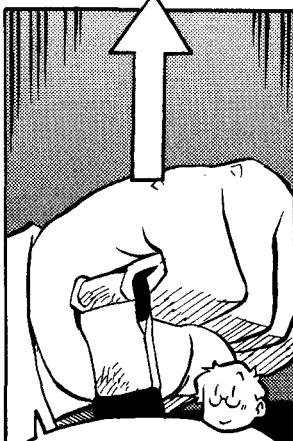
ПРИ ЭТОМ НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ ДВИЖЕНИЯ СУМКИ, ПОЭТОМУ ЗНАК РАБОТЫ — ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ.

ЭТО ЗНАЧИТ,
ЧТО ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ УВЕЛИЧИЛАСЬ.



КОГДА ПОДНЯТУЮ СУМКУ ОПУСКАЮТ, НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОТИВОПОЛОЖНО НАПРАВЛЕНИЮ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, ПОЭТОМУ ОКАЗЫВАЕТСЯ, ЧТО НАД СУМКОЙ СОВЕРШИЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ РАБОТУ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ УМЕНЬШИТСЯ.

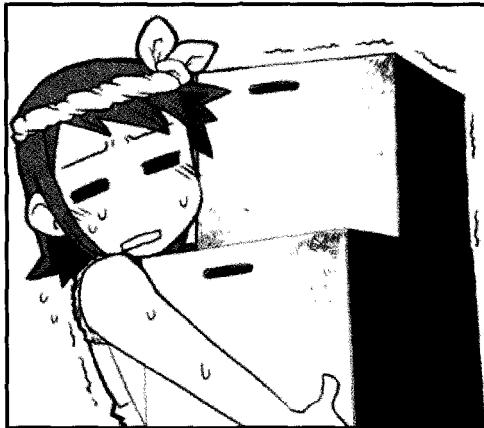
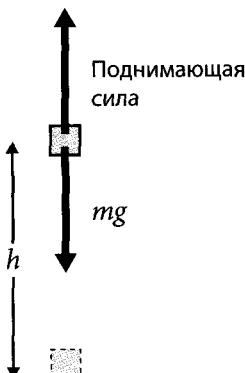




Лаб РАБОТА И СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ



Рассмотрим ситуацию, когда мы поднимаем тяжёлый груз на определённую высоту. Самый простой способ — поднимать его вертикально вверх, как это показано на рисунке внизу.



То есть мы поднимаем груз массой m на высоту h .



Рассмотрим работу, которая совершается при подъёме тела на высоту h , приложив к нему силу, уравновешивающую силу тяжести, другими словами, силу, которая равна силе тяжести. Сила тяжести равна mg , где g — ускорение свободного падения. Значит, поднимающая сила тоже равна mg , и мы получим

$$\text{работа подъёма} = \text{поднимающая сила} \times \text{высота } h = mg \cdot h.$$

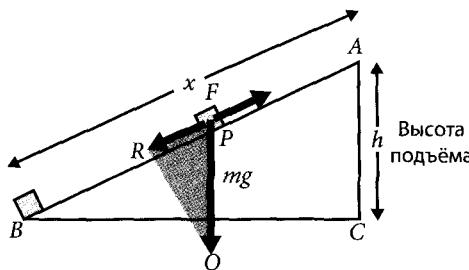
Заметим, что для простоты мы не будем учитывать в наших примерах трение или сопротивление воздуха. Кстати, поднимать груз вертикально вверх — очевидный способ подъёма, но не самый лёгкий.



Хм... может, было бы проще толкать груз вверх по наклонной плоскости, поставив его на тележку?



Да, давай рассмотрим вариант с перемещением груза вверх по скату.



При этом сила, необходимая для подъёма груза, должна быть такой, чтобы уравновесить составляющую силы тяжести, параллельную склону, значит, она должна быть такой же, как сила F на рисунке. Тогда работа, совершаемая при поднятии тела из точки B в точку A , если принять длину склона за x , будет равна

$$\text{работа} = Fx.$$

Итак, сила F , параллельная склону, будет явно меньше, чем mg . Однако путь, на протяжении которого нужно прикладывать силу, увеличится во столько же раз.



Значит, в конце концов работа будет такой же, как в случае вертикального подъёма...



Давай в этом убедимся с помощью математики. Как видно из рисунка, $\triangle ABC$, представляющий собой горку, по которой двигают груз, и $\triangle PQR$, образованный разложением силы тяжести mg на составляющие, являются прямоугольными, и угол $CAB =$ углу RQP . Следовательно, эти треугольники являются подобными, т. е. их углы равны, а длины сторон пропорциональны. Это значит, что отношения их соответствующих сторон равны. Таким образом, справедливо следующее:

$$\frac{AB}{AC} = \frac{PQ}{PR}.$$

Подставив сюда $AB = x$, $AC = h$, $PQ = mg$, $PR = F$, получим

$$\frac{x}{h} = \frac{mg}{F},$$

или

$$Fx = mgh.$$



Поэтому работа, совершаемая при подъёме по склону, равна работе, совершаемой при подъёме вертикально вверх.



То есть мы смогли убедиться в принципе сохранения работы с помощью формул...



Обрати внимание, что полученный результат не зависит от угла наклона плоскости. Таким образом, из принципа сохранения работы следует, что вне зависимости от пути работа по подъёму тела массой m на высоту h равна

$$\text{сила, уравновешивающая силу тяжести} \times \text{высота} = mgh.$$



Значит, какой бы способ мы ни выбрали, совершаяшая работа будет одинаковой.



Иначе говоря, благодаря работе потенциальная энергия увеличивается на величину mgh .



А когда мы опускаем тело, получается, что мы совершаляем отрицательную работу, поэтому потенциальная энергия уменьшается ровно на столько же.



И это не зависит от того, на какой высоте тело находилось изначально. То есть за уровень отсчёта мы можем принять любую высоту.

РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

ЧТО ПРОИСХОДИТ?
КАЖЕТСЯ, Я
УМЕНЬШАЮСЬ...

РАБОТА
СОВЕРШАЕТСЯ
НЕ ТОЛЬКО ПРИ
УВЕЛИЧЕНИИ ИЛИ
УМЕНЬШЕНИИ
ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ
ЭНЕРГИИ,

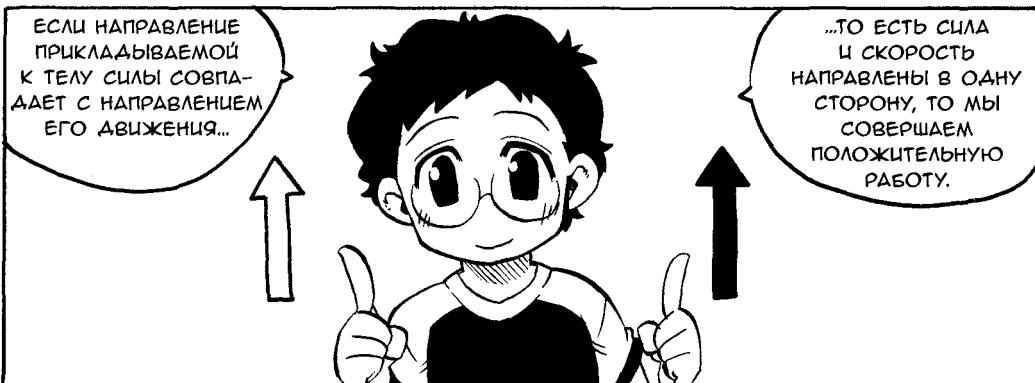
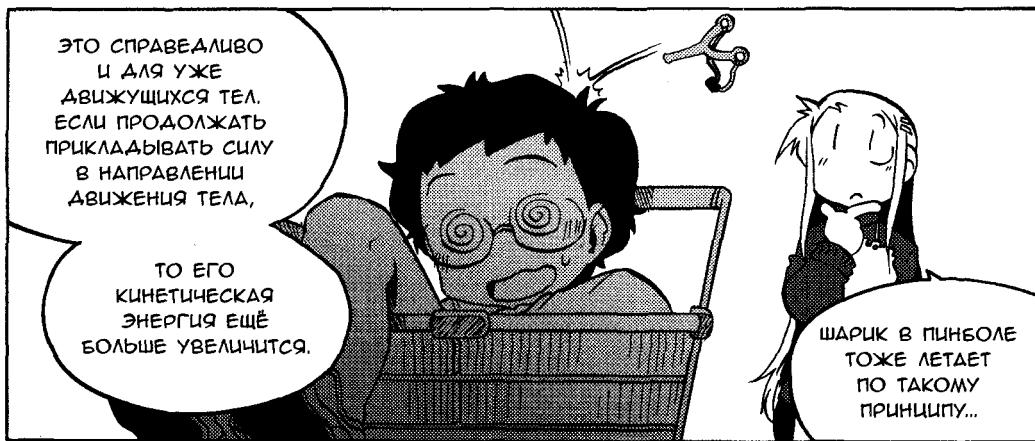
НО ТАКЖЕ И ПРИ
УВЕЛИЧЕНИИ
ИЛИ УМЕНЬШЕНИИ
КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ.

ЧТО ЗА...

Я СТАЛА
БОЛЬШЕ...

ХОЧЕШЬ
СКАЗАТЬ, ЧТО РАБОТА
СОВЕРШАЕТСЯ
И ТОГДА, КОГДА МЫ
ДВИГАЕМ ИЛИ
ОСТАНАВЛИВАЕМ ТЕЛО?





СЛЕДОВАТЕЛЬНО,
ИЗМЕНЕНИЕ
КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
Тоже ПОЛОЖИТЕЛЬНО,
ТО ЕСТЬ КИНЕТИЧЕСКАЯ
ЭНЕРГИЯ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.

МАМА, КУПИ
СЛАДОСТИ!

ПО ЭТОМУ ЖЕ
ПРИНЦИПУ ТЫ МОЖЕШЬ
ОСТАНОВИТЬ
ДВИЖУЩЕЕСЯ ТЕЛО,
ПРИЛОЖИВ К НЕМУ СИЛУ
В НАПРАВЛЕНИИ, ПРОТИ-
ВОПОЛОЖНОМ ЕГО
СКОРОСТИ. " "

УМЕНЬШИВ ЕГО
КИНЕТИЧЕСКУЮ
ЭНЕРГИЮ,
Я ПОЛАГАЮ.

БЕГУ-БЕГУ-
БЕГУ...

ТОП-ТОП-ТОП

В ЭТОМ СЛУЧАЕ
НАПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ
И СИЛЫ ПРОТИВОПОЛОЖНЫ,
ЗНАЧИТ, ЗНАК РАБОТЫ
ОТРИЦАТЕЛЕН.

СЛЕДОВАТЕЛЬНО,
ИЗМЕНЕНИЕ
КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
Тоже ОТРИЦАТЕЛЬНО —
ОНА УМЕНЬШАЕТСЯ.

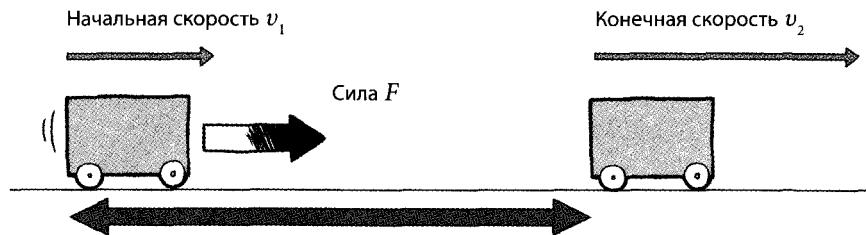
ЭТО БЫЛО СТРАННО.
Я РАД, ЧТО СНОВА
СТАЛ СОБОЙ.

КАКАЯ
ЖАЛОСТЬ!

Лаб СВЯЗЬ МЕЖДУ РАБОТОЙ И КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ



Посмотрим, как выводится уравнение, описывающее связь между работой и кинетической энергией. Предположим, что мы прикладываем силу F к тележке, совершающей равномерное и прямолинейное движение в направлении, совпадающем с направлением её скорости. Масса тележки — m , а её начальная скорость v_1 .



Отрезок пути x , вдоль которого к тележке прикладывается сила



То есть мы прикладываем силу к уже движущемуся телу.



В нашем случае справедливо следующее:

работа, совершенная над телом = Fx .

А обозначив конечную скорость v_2 , мы можем записать изменение кинетической энергии тела:

$$\text{изменение кинетической энергии} = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2.$$

А раз мы уже знаем, что изменение кинетической энергии равно совершенной над телом работе, то можем записать:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = Fx.$$



Ага.

Давай обсудим!



Мы можем получить это равенство и другим способом. Раз силу F мы определили как константу, то тележка совершает равноускоренное движение. Следовательно, если мы обозначим ускорение тележки a , то получим (см. формулу (3) на стр. 87)

$$v_2^2 - v_1^2 = 2ax.$$

Используя уравнение движения

$$ma = F,$$

получим:

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2Fx}{m}.$$

Остается умножить левую и правую части уравнения на $\frac{1}{2}m$:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = Fx.$$

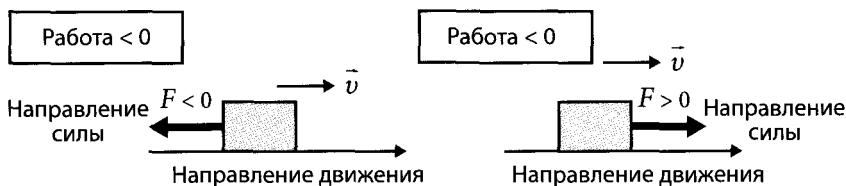


Думаю, если буду внимательно считать, то у меня тоже всё получится. Кроме того, если направление движения и направление силы совпадают, тогда $F > 0$, значит, $Fx > 0$, т. е. окажется, что над телом совершена положительная работа (x всегда имеет знак плюс, так как показывает пройденное расстояние). При этом:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 > 0, \text{ или}$$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 > \frac{1}{2}mv_1^2,$$

т. е. кинетическая энергия возрастает. Наоборот, если направление движения и направление силы противоположны, то $F < 0$, значит, $Fx < 0$, т. е. окажется, что совершена отрицательная работа. Следовательно, кинетическая энергия уменьшается.



● ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ И СКОРОСТЬ

НА ОСНОВАНИИ РАВЕНСТВА
“КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ = РАБОТА”
РАССМОТРИМ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ АВТОМОБИЛЯ.

ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ?

ЭТО РАССТОЯНИЕ, КОТОРОЕ ПРОХОДИТ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО ОТ НАЧАЛА ТОРМОЖЕНИЯ ДО ПОЛНОЙ ОСТАНОВКИ.

НАПРИМЕР,
ПРЕДСТАВЬ, ЧТО ТЫ ЕХАЛА НА ВЕЛОСИПЕДЕ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ, А ПОТОМ НАЖАЛА НА ТОРМОЗ...

ЗНАЯ, ЧТО ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ РАВНО СОВЕРШЕННОЙ РАБОТЕ, МОЖНО ЗАПИСАТЬ СЛЕДУЮЩЕЕ РАВЕНСТВО:

$$\frac{1}{2} \times \text{масса} \times \text{скорость} \times \text{скорость} = \\ = \text{сила торможения} \times \text{тормозной путь}$$

ШВЗИ-И!



АГА, ОТЛИЧНОЕ ПОНИМАНИЕ СУТИ ЭТОЙ ЗАВИСИМОСТИ.
ОПАСНО ПОЛАГАТЬ, ЧТО ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ЛИНЕЙНО ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ МАШИНЫ.



АА УЖ,
ОПРЕДЕЛЕННО.

ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ДЕЙСТВИТЕЛЬНО УЧЕТВЕРЯЕТСЯ, ЕСЛИ СКОРОСТЬ УДВАИВАЕТСЯ.

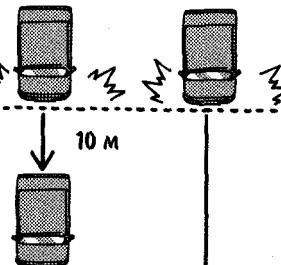


ДЛЯ ВЕЛОСИПЕДА ЭТО НЕ ТАК УЖ И СТРАШНО, А ВОТ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ МОЖЕТ ИМЕТЬ СЕРЬЕЗНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ.

НАПРИМЕР,
ПРЕДСТАВЬ, ЧТО МАШИНА ЕДЕТ СО СКОРОСТЬЮ 40 КМ/Ч И ЕЁ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ РАВЕН 10 М. ЕСЛИ ЖЕ ЭТА ЖЕ МАШИНА ЕДЕТ СО СКОРОСТЬЮ 120 КМ/Ч, ТО ЕСТЬ В ТРИ РАЗА БЫСТРЕЕ, ЧЕМУ РАВЕН ЕЁ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ?



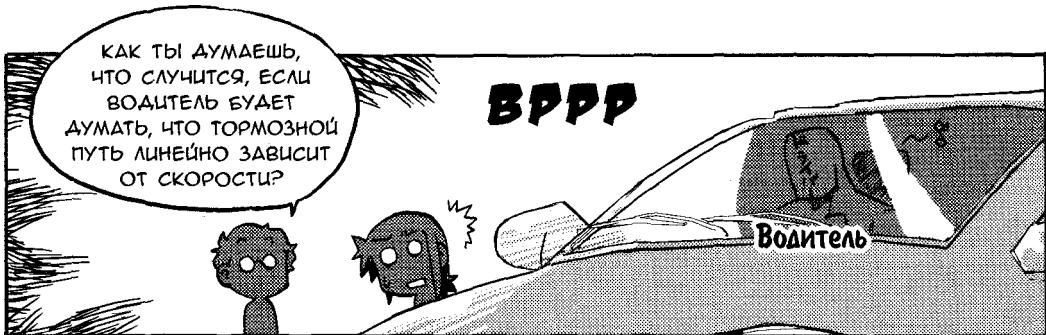
40 км/ч
120 км/ч



ЭМ-М-М...
РАЗ СКОРОСТЬ В ТРИ РАЗА БОЛЬШЕ, ТО НАМ ПРОСТО НУЖНО ВОЗВЕСТИ ЭТО В КВАДРАТ. ЧТОГО:
 $3 \times 3 = 9$, ТО ЕСТЬ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ В ДЕВЯТЬ РАЗ БОЛЬШЕ, ИЛИ $10 \text{ м} \times 9 = 90 \text{ м}$.



ГМ....



4.2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ



ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ

ИТАК, МЫ ЗНАЕМ,
ЧТО КИНЕТИЧЕСКАЯ
ЭНЕРГИЯ МОЖЕТ
ПЕРЕХОДИТЬ
ПОТЕНЦИАЛЬНОУ,
И НАОБОРОТ.

ДА, ВЕДЬ ПРИ ЭТОМ
ЭНЕРГИЯ ДОЛЖНА
СОХРАНЯТЬСЯ.

**ТОП-
ТОП-
ТОП**

ВНОВЬ ПОКАЖЕМ
ЭТО НА ПРИМЕРЕ
ТВОЕГО ПРЫЖКА
В ВЫСОТУ
С РАЗБЕГА.

КОГДА ТЫ ОТТАЛКИВА-
ЕШЬСЯ ОТ ЗЕМЛИ, ТВОИ
МЫШЦЫ СОВЕРШАЮТ РА-
БОТУ, ЧТОБЫ ПЕРЕДАТЬ
ТВОЕМУ ТЕЛУ КИНЕТИЧЕ-
СКУЮ ЭНЕРГИЮ.

ПОСЛЕ ТОЛЧКА,
ЧЕМ ВЫШЕ ТЫ ПОАЛЕДАЕШЬ,
ТЕМ МЕНЬШЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ У ТЕБЯ ОСТАЁТСЯ.

ПРЫГ!

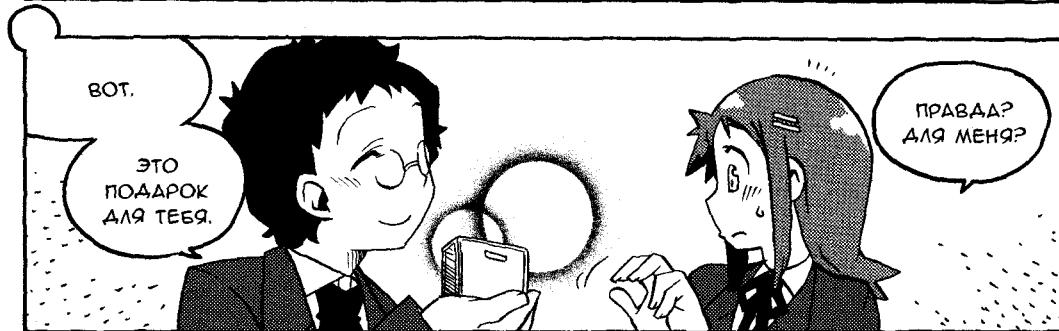
В НАИВЫШЕЙ ТОЧКЕ
У ТЕБЯ НЕТ КИНЕТИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ, ТАК КАК ТВОЯ
СКОРОСТЬ РАВНА НУЛЮ.

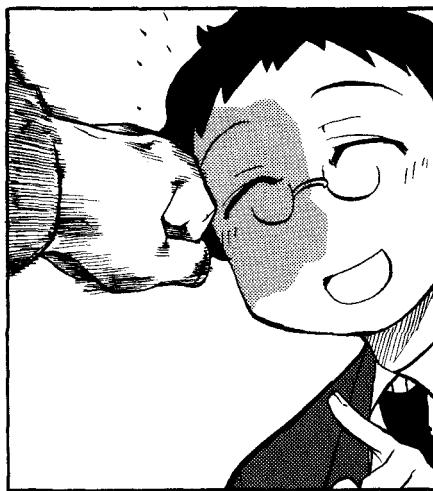
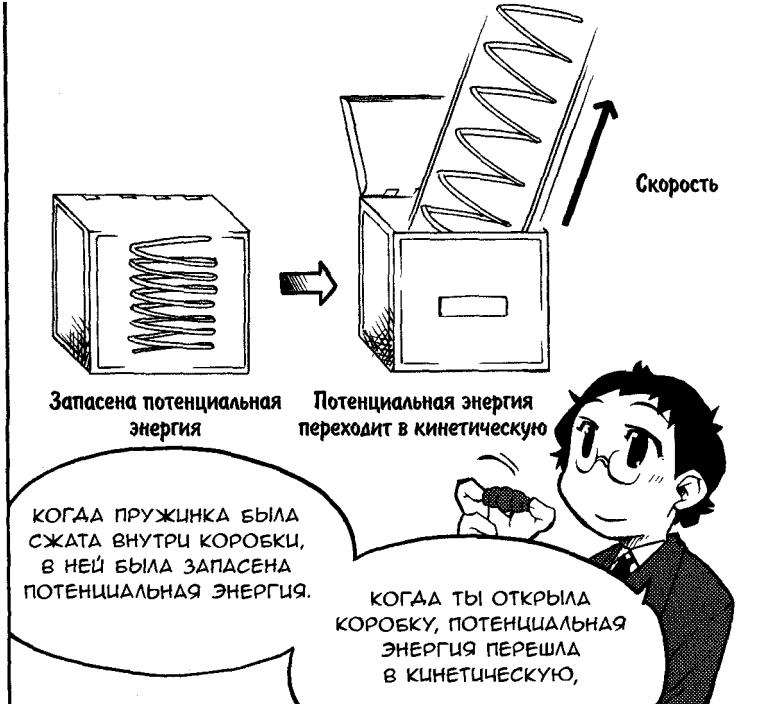
ПРИ ЭТОМ КИНЕТИЧЕСКАЯ
ЭНЕРГИЯ БЫСТРО
ПРЕВРАЩАЕТСЯ
В ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ
ЭНЕРГИЮ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ,
И В НАИВЫШЕЙ ТОЧКЕ
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ
ДОСТИГАЕТ
МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ.

ВОТ ТАК
КИНЕТИЧЕСКАЯ
ЭНЕРГИЯ
ПРЕВРАЩАЕТСЯ
В ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ.

ПОСЛЕ ПРОХОЖДЕНИЯ НАИВЫШЕЙ
ТОЧКИ ТВОЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ
ЭНЕРГИЯ ПЕРЕХОДИТ ОБРАТНО
В КИНЕТИЧЕСКУЮ. ВО ВРЕМЯ
ПРИЗЕМЛЕНИЯ ЭТА КИНЕТИЧЕСКАЯ
ЭНЕРГИЯ СОВЕРШАЕТ РАБОТУ
НАД МАТОМ.

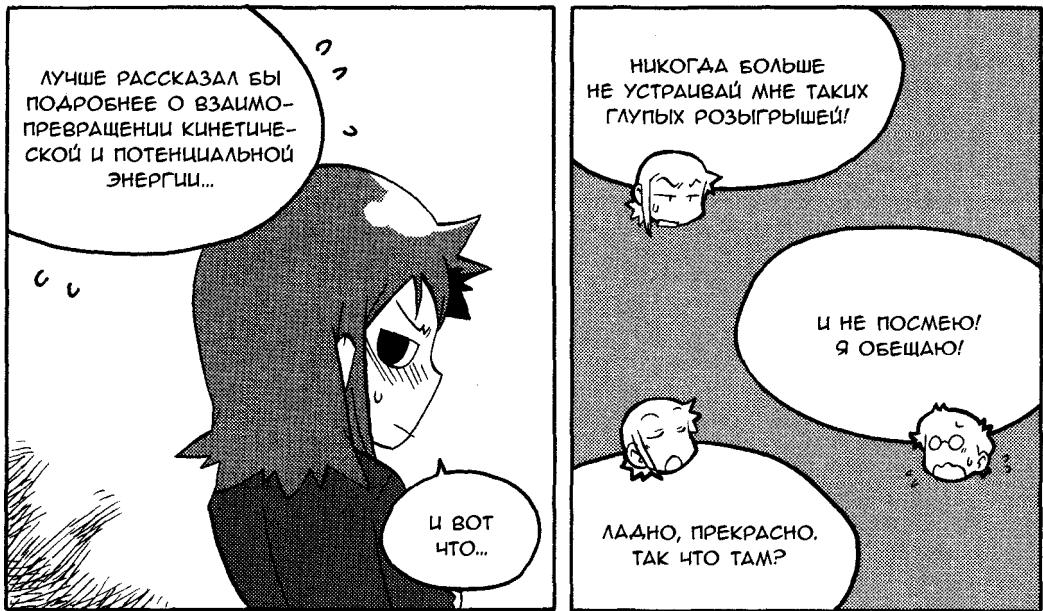


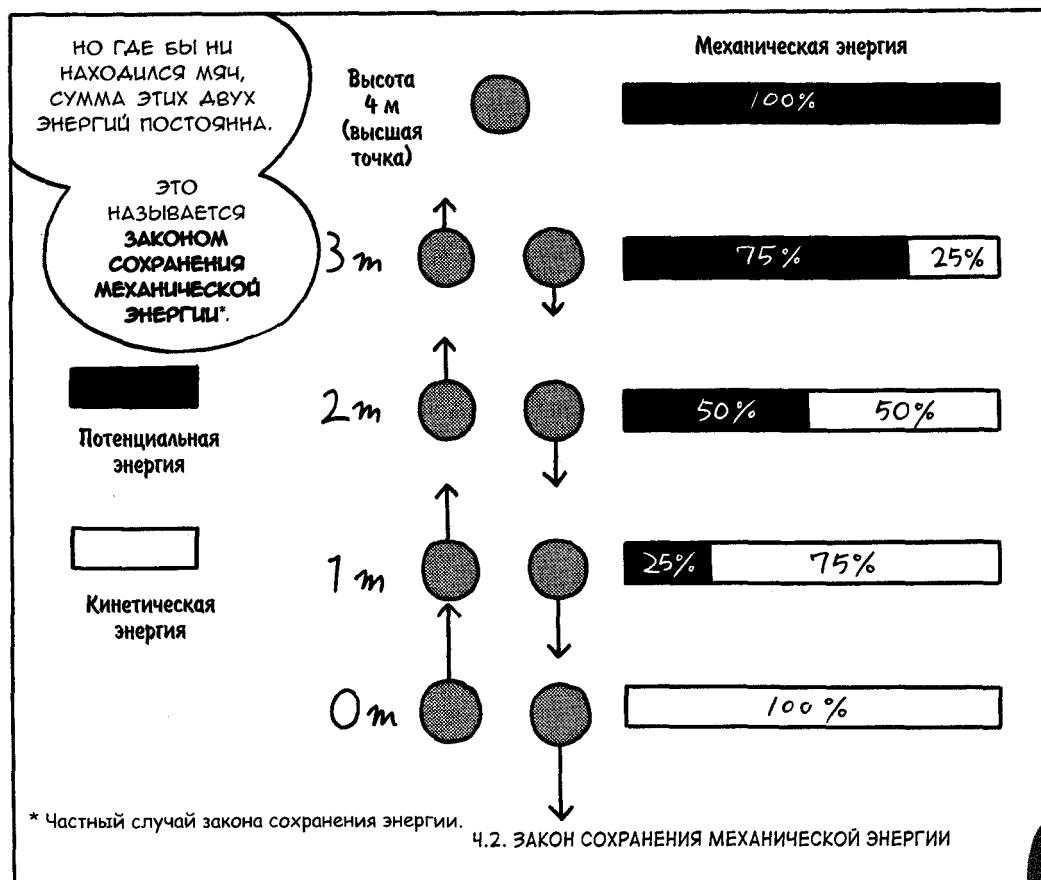




СОХРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ВОТ УЖ НИКОГДА БЫ
НЕ ПОДУМАЛ,
ЧТО СПОРТСМЕНКА
ВРОДЕ ТЕБЯ...







Лаб ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ДЕЙСТВИИ



Докажем, что закон сохранения механической энергии работает, когда мы бросаем мяч вертикально вверх.

Для начала запишем уже известное нам выражение для работы и изменения кинетической энергии:

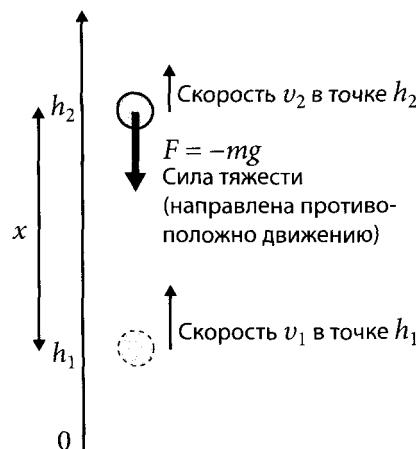
$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = Fx.$$



Да, мы уже доказали это в недавней лабораторной работе «Связь между работой и кинетической энергией» (стр. 178).



В нынешнем случае работа Fx соответствует работе силы тяжести. Положим, мяч подбрасывают с высоты h_1 со скоростью v_1 . Пролетев расстояние x , он оказывается на высоте h_2 , а его скорость становится равной v_2 . Расстояние x можно представить как изменение высоты, или $h_2 - h_1$.



Значит, мы будем подставлять это в формулу

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = Fx?$$



Именно. Сила тяжести действует в направлении, противоположном скорости. Поэтому она записывается так:

$$F = -mg.$$

Это значит, что работа, совершенная силой тяжести, равна

$$Fx = -mg(h_2 - h_1).$$

Воспользовавшись первоначальным равенством, получаем

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = -mg(h_2 - h_1).$$

Переписав это, мы получим

$$\frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1.$$



Это и есть закон сохранения механической энергии?



Да. Поясню эту формулу на словах.

$\frac{1}{2}mv_2^2$ — это кинетическая энергия на высоте h_2 ;

mgh_2 — это потенциальная энергия на высоте h_2 .

Значит, левая часть равенства, являющаяся суммой кинетической и потенциальной энергии, выражает механическую энергию, которой тело будет обладать на высоте h_2 .



Если рассуждать так, то правая часть равенства показывает механическую энергию, которой тело обладало на высоте h_1 , да?



Совершенно верно. Энергия на высоте h_1 — это механическая энергия в момент броска, значит, верхняя формула соответствует равенству

Механическая энергия на высоте h_2 =
= механическая энергия в момент броска.



Да, это я поняла.



Другими словами, механическая энергия подброшенного мяча на любой высоте всё время равна значению первоначальной механической энергии. Используя формулу закона сохранения механической энергии, можно узнать, с какой скоростью надо бросить мяч, чтобы он поднялся на заданную высоту. Так как в наивысшей точке кинетическая энергия мяча равна 0, значит, будет выполняться соотношение:

$$mgh_2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1,$$

или

$$mg(h_2 - h_1) = \frac{1}{2}mv_1^2.$$



Ага, значит, вся кинетическая энергия, которой мяч обладал первоначально, превратилась в потенциальную!



Ты права! Если мы хотим узнать, какова должна быть скорость v_1 , чтобы мяч долетел до высоты h , нам достаточно преобразовать это соотношение:

$$v_1^2 = 2g(h_2 - h_1).$$



Подставив числа в это уравнение, мы сможем найти начальную скорость, которой должен обладать мяч, чтобы достичь заданной высоты!



НАХОДИМ СКОРОСТЬ И ВЫСОТУ ПОДБРОШЕННОГО МЯЧА

ПРИМЕНИМ ФОРМУЛУ, ВЫВЕДЕННУЮ НАМИ ИЗ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ,

ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ СКОРОСТИ, С КОТОРОЙ НУЖНО ПОДБРОСИТЬ МЯЧ, ЧТОБЫ ОН ПОДЛЕТЕЛ НА 4 М.

ДОПУСТИМ, МЫ БРОСАЕМ ЕГО ИЗ НАЧАЛЬНОЙ ТОЧКИ О М,

ПОДСТАВЬ В ФОРМУЛУ

$$v_1^2 = 2gh$$

ЗНАЧЕНИЯ

$$g = 9.8 \text{ м/с}^2, \text{ А } h = 4 \text{ м.}$$

МИНУТКУ...

$$v_1 = \sqrt{2gh},$$

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot 9.8 \text{ м/с}^2 \cdot 4 \text{ м}}$$

$$v_1 = 8.9 \text{ м/с.}$$

...ЭТО ВЕРНО?

АА, АБсолютно!

ПЕРЕВЕДЯ ОТВЕТ В КИЛОМЕТРЫ В ЧАС, ПОЛУЧИМ
 $8.9 \text{ м/с} \times 3600/1000 =$
 $= 32 \text{ км/ч.}$

АГА!

С ПОМОЩЬЮ ЭТОГО ЖЕ РАВЕНСТВА МЫ МОЖЕМ ПОСЧИТАТЬ, КАК ВЫСОКО ПОДЛЕТИТ МЯЧ, БРОШЕННЫЙ СО СКОРОСТЬЮ 100 КМ/Ч.

АА, ДАВАЙ ПОСЧИТАЕМ...
МЫ ЗНАЕМ, ЧТО
 $h = v_0^2/2g.$

ЗНАЧИТ,
ОН ПОДЛЕТИТ
ПРИМЕРНО
НА 39 М.

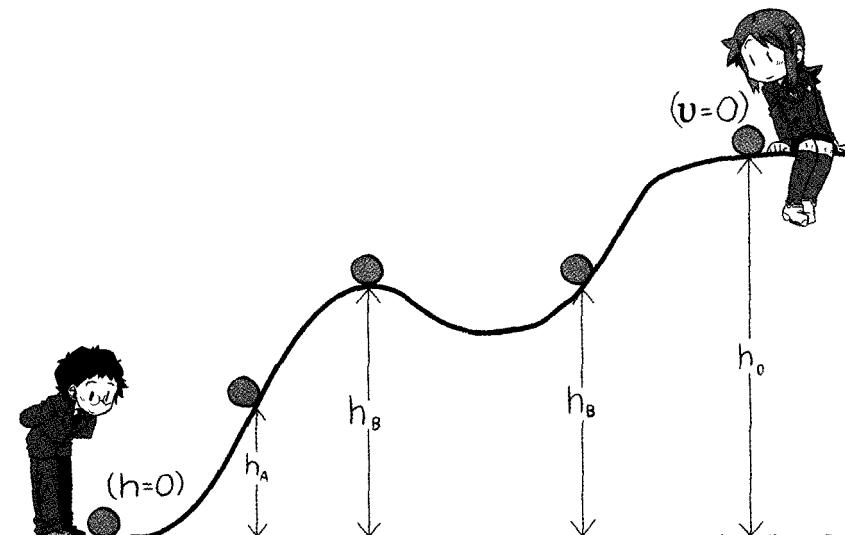
Лаб СОХРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА СКЛОНЕ



Закон сохранения механической энергии выполняется не только при подбрасывании вертикально вверх, верно? Что будет, например, если мяч скатывается по склону?



Что ж, давай рассмотрим ситуацию, когда ты скатываешь мяч с высоты h до нулевой высоты. Во время спуска будем считать, что мяч имеет скорость v_A на высоте h_A и скорость v_B на высоте h_B .



Так как в наивысшей точке $v = 0$, то полная механическая энергия мяча E равна его начальной потенциальной энергии. Зная, что потенциальная энергия на высоте h равна mgh , можем записать:

$$E = mgh.$$



Теперь, если скорость после скатывания, когда $h = 0$, обозначить v , то как можно выразить E ? Вспомни пример с подбрасыванием мяча.



По-моему, в наивысшей точке вся кинетическая энергия превратилась в потенциальную, значит,

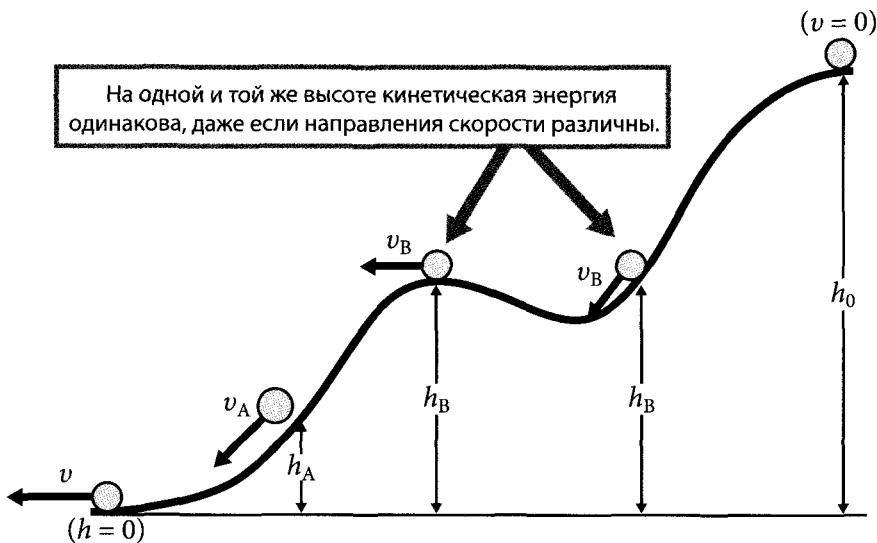
$$E = \frac{1}{2}mv^2, \text{ да?}$$



Точно! Так как механическая энергия в промежуточных точках тоже не возрастает и не убывает, сумма кинетической и потенциальной энергии, конечно, будет равной E . То есть выполняется равенство

$$\frac{1}{2}mv_A^2 + mgh_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgh_B.$$

Обрати внимание, если высота точек одинакова, как в двух точках B на рисунке, то потенциальная энергия в этих точках тоже будет одинакова, поэтому и кинетическая энергия в них будет одинакова, даже если направление скорости различны.





Получается, что кинетическая энергия не связана с направлением скорости!



Да! Кинетическая энергия — это только значение. Аналогично потенциальная энергия зависит только от высоты.



Если мы продлим склон, сможет ли мяч снова подняться до первоначальной высоты?



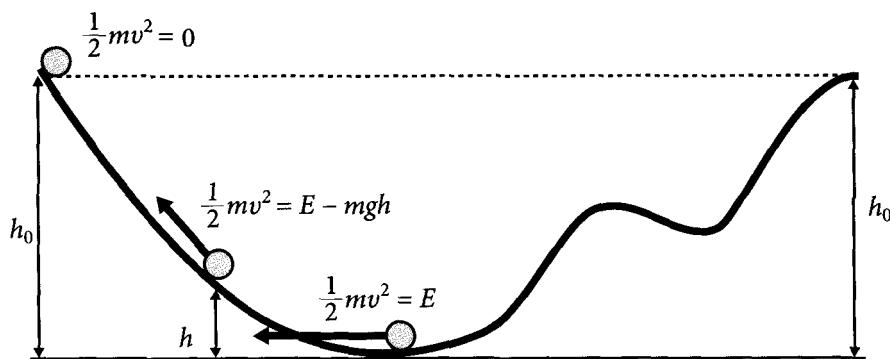
Да, сможет, при условии, что трение и сопротивление воздуха пренебрежимо малы. Приняв высоту на пути подъёма за h , найдём механическую энергию на этой высоте, воспользовавшись законом сохранения энергии:

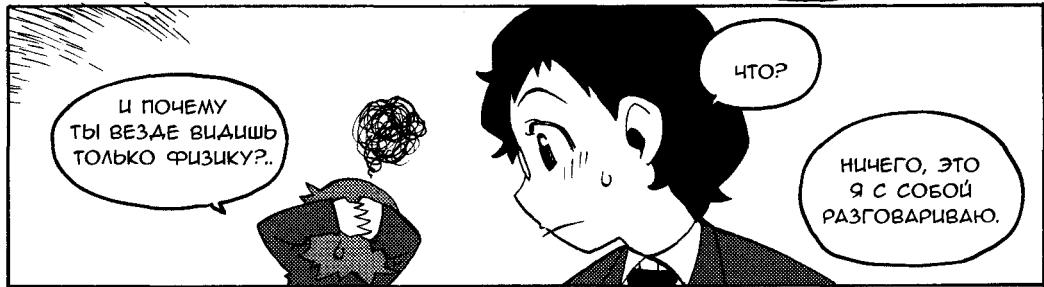
$$\frac{1}{2}mv^2 = E - mgh.$$

По мере подъёма кинетическая энергия будет убывать, а на высоте h_0 станет равна

$$\frac{1}{2}mv^2 = E - mg h_0 = 0,$$

т. е. исчезнет совсем. Выше h_0 мяч подняться не сможет. Если ничего с ним не делать, он затем начнёт скатываться по тому же пути, по которому поднимался.









ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!

Единицы энергии

Единицу энергии можно найти из определения кинетической энергии:

$$\text{кинетическая энергия} = \frac{1}{2} \times \text{масса} \times (\text{скорость})^2.$$

Из этого следует:

$$\begin{aligned}\text{единица энергии} &= \text{единица массы} \times \text{единица скорости} \times \text{единица скорости}, \\ \text{или } 1 \text{ джоуль} &= \text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2.\end{aligned}$$

Так как энергия — широко распространённая физическая величина, то для неё была установлена специальная единица измерения — джоуль (Дж). С другой стороны, зная, что изменение кинетической энергии равно совершённой работе (как мы выяснили на стр. 176), получаем

$$\text{единица энергии} = \text{единица работы}.$$

Но справедливо также следующее:

$$\text{единица работы} = \text{единица силы} \times \text{единица длины} = (H) \times (m) = (H \cdot m).$$

На первый взгляд вторая единица ($H \cdot m$) непохожа на джоуль ($\text{кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}^2$). Но вспомним, что ньютон (H) равен $1 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$. Тогда, умножив силу на расстояние, получим ту же самую единицу.

Чтобы понять, сколько энергии содержится в 1 Дж, полезно помнить, что 1 Дж равен 1 Н·м. Другими словами, можно сказать, что 1 Дж равен работе по перемещению тела на 1 м под действием силы 1 Н.

Кроме того, мы знаем, что сила тяжести, действующая на тело массой 1 кг, равна 9.8 Н. Значит, масса тела, сила тяжести которого равна 1 Н, равна $1 / 9.8 \text{ кг} = 0.102 \text{ кг} = 102 \text{ г}$. Вот что имелось в виду, когда было сказано, что «один джоуль соответствует энергии, необходимой для того, чтобы поднять груз массой 102 г на 1 м» (см. стр. 161).

Помимо джоуля, ещё одной распространённой единицей энергии является калория (кал), которую используют для тепловых измерений, например для обогревателей и пищевых продуктов. Одна калория (1 кал) соответствует тепловой энергии, необходимой для нагрева 1 грамма воды на 1°C при давлении в 1 атмосферу (1 атм). В джоулях эта величина равна: 1 кал = 4.2 Дж.

Для пищевых продуктов используют килокалорию (ккал). Одна килокалория равна 1000 калорий. И хотя в разговорной речи при обсуждении энергоёмкости еды и диет мы говорим о калориях, фактически речь идёт о килокалориях.

Например, энергия 50 г мороженого равна примерно 100 ккал. Если перевести это в джоули, то получим

$$100 \text{ ккал} = 100000 \text{ кал} = 4.2 \times 100000 \text{ Дж} = 420000 \text{ Дж.}$$

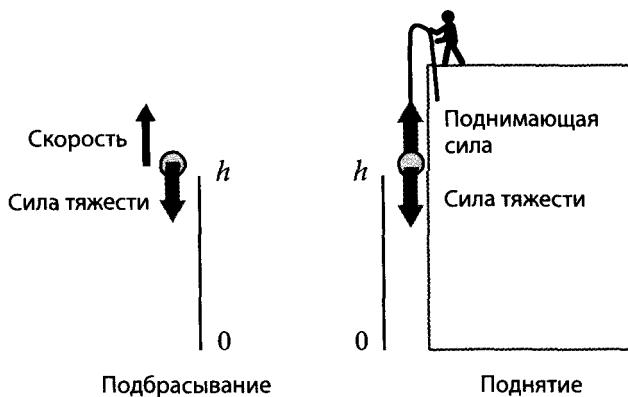
Выглядит это как довольно большая величина, но на самом деле это не так, если сравнить её с количеством энергии, необходимым нам для жизни. По данным Министерства здравоохранения, труда и благосостояния Японии, в день необходимо потреблять около 2200 ккал для 17-летней девушки и около 2700 ккал для 17-летнего юноши. В джоулях это равно

$$2200 \text{ ккал} \times 1000 \text{ кал/ккал} \times 4.2 \text{ Дж/кал} = 9240000 \text{ Дж.}$$

Оценим, насколько это много. Раз энергия, необходимая для поднятия груза массой 1 кг на 1 м, равна 9.8 Дж, то полученная нами величина соответствует энергии, необходимой для поднятия груза массой 1000 000 кг на 1 м! Это говорит о том, что ежедневно для поддержания жизни мы потребляем гигантское количество энергии.

➊ РАЗЛИЧИЕ МЕЖДУ РАБОТОЙ ПО ПОДЪЁМУ ТЕЛА И РАБОТОЙ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Так как на тело, поднятое вертикально вверх, действует только сила тяжести, работу над телом тоже совершает только она. С другой стороны, в случае приложения к телу силы, поднимающей его вертикально вверх, к телу приложены две силы: сила тяжести и поднимающая сила — работу над телом совершает каждая из них. Давайте выясним различие работ, совершаемых при подбрасывании и при поднятии тела.



Для начала рассмотрим работу в случае подбрасывания. Работа, которую сила тяжести совершила с момента подбрасывания тела массой m вертикально вверх

и до момента достижения высоты h (учитывая, что сила тяжести = $-mg$, так как направление силы тяжести противоположно направлению движения тела):

$$\text{работа} = -mgh. \quad (1)$$

Эта работа, равная $-mgh$, исходя из равенства

изменение кинетической энергии тела = работа, совершенная над телом, становится изменением кинетической энергии. Приняв скорость тела в момент подбрасывания за v_0 , а скорость в момент достижения высоты h — за v , мы имеем

$$\text{изменение кинетической энергии} = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Объединив эти три соотношения, получим:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -mgh,$$

или

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgh = \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Из этого следует, что в случае подбрасывания гравитационная потенциальная энергия увеличивается на величину работы, совершенной силой тяжести.

Теперь рассмотрим случай поднятия.

Положим, что тело поднимают медленно, с постоянной скоростью. Из первого закона движения следует, что сила, действующая на тело, равна 0, т. е. силы уравновешиваются, значит, поднимающая сила и сила тяжести (в качестве векторов) связаны следующим соотношением:

$$\text{поднимающая сила} + \text{сила тяжести} = 0.$$

Следовательно,

$$\text{поднимающая сила} = -\text{сила тяжести} = mg,$$

из чего следует, что

$$\text{работа, совершаемая поднимающей силой над телом} = mgh.$$

Разумеется, выполняется соотношение

$$\text{работа поднимающей силы над телом} + \text{работка силы тяжести над телом} = 0$$

(сравните это с формулой (1)). В случае поднятия

$$\text{изменение кинетической энергии} = 0,$$

значит, равнодействующая сила не совершает работы. Работа, совершенная поднимающей силой над телом, стала гравитационной потенциальной энергией mgh .

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Кинетическая энергия — это энергия, которой обладает движущееся тело. В отличие от этого, потенциальной энергией (энергией положения) тела не обладают: это энергия, запасённая в пространстве. В качестве типичных примеров потенциальной энергии можно привести гравитационную потенциальную энергию, ответственную за возникновение силы всемирного тяготения, или энергию электростатического поля, создающую силы электростатического притяжения и отталкивания.

Энергия упругости пружины или резинки тоже может рассматриваться как один из видов потенциальной энергии, но восстанавливающие силы возникают в пружине и в резинке по разным причинам. В обычной пружине в результате деформации расстояние между атомами (оно определяется потенциальной энергией сил электростатического поля, действующих между атомами) отклоняется от стабильного значения и начинают действовать силы, стремящиеся восстановить первоначальное расстояние. Используемые на практике спиральные пружины превращают малые деформации, соответствующие изгибу прямого металлического бруска на следующем рисунке, в большие перемещения.



Упругость резинки возникает по другой причине. Когда резинка не растянута, её макромолекулы сильно изогнуты, т. е. находятся в состоянии с большой «неупорядоченностью». При растягивании они выстраиваются, переходя в состояние с малой «неупорядоченностью», и поэтому стремятся опять вернуться в прежнее неупорядоченное состояние.

- 1) Используемое здесь понятие «неупорядоченность» в физике называют энтропией. В общем случае даже при равных уровнях энергии реализуется состояние с более высокой энтропией. Например, если капнуть в воду чернила, то они начнут смешиваться с водой. Это происходит потому, что состояние, в котором чернила перемешаны с водой, соответствует более высокой энтропии (более «неупорядоченно»), чем состояние, в котором они собраны в одном месте.



⚽ СКОРОСТЬ И ВЫСОТА ПОДБРАСЫВАНИЯ

На стр. 194 на вопрос Мегуми: «Как высоко подлетит мяч, брошенный со скоростью 100 км/ч?» Риота отвечает: «На 39 м». Давай убедимся в этом.

Из $v_0^2 = 2gh$ следует:

$$h = v_0^2/2g.$$

$$100 \text{ км/ч} = 100 \times 1000/3600 \text{ м/с},$$

значит,

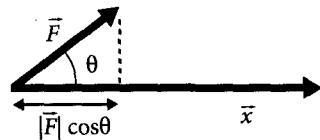
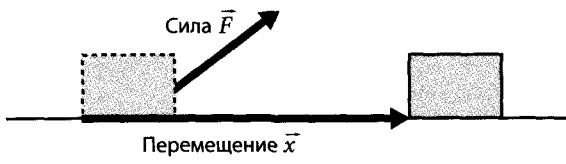
$$h = \frac{(1000/36)^2}{2 \times 9.8} \approx 39.4 \text{ [м].}$$

🏀 НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ И РАБОТА

Работа выражается через силу и перемещение тела, однако и сила \vec{F} , и перемещение \vec{x} являются векторами. Если направление силы и направление перемещения не совпадают, то работа W выражается следующим образом:

$$W = |\vec{F}| |\vec{x}| \cos\theta.$$

Здесь $|\vec{x}|$ — это пройденное расстояние, а $|\vec{F}| \cos\theta$ — это составляющая силы в направлении движения тела.



$|\vec{F}| |\vec{x}| \cos \theta$ — это скалярное произведение двух векторов: \vec{F} и \vec{x} , т. е. $\vec{F} \times \vec{x}$, поэтому выражение для работы можно записать и в следующем виде¹⁾:

$$W = \vec{F} \times \vec{x}.$$

Для случая, когда направление силы и направление перемещения совпадают, как на стр. 179, мы получим

$$W = |\vec{F}| |\vec{x}|.$$

То есть окажется, что

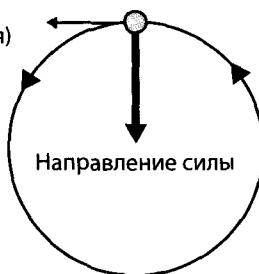
работа = сила \times пройденный путь,

и работа будет положительной. При этом кинетическая энергия тела, над которым совершается работа, будет возрастать. В том случае, если сила направлена противоположно перемещению, то $\cos \pi = -1$, поэтому

$$W = - |\vec{F}| |\vec{x}|,$$

и работа будет отрицательной. При этом кинетическая энергия тела, над которым совершается работа, будет уменьшаться. Когда же сила направлена перпендикулярно перемещению, так как $\cos(\pi/2) = 0$, значит, $W = 0$, т. е. работа не совершается. Типичный пример перпендикулярного направления силы и перемещения — это равномерное движение по окружности. При таком движении на тело действует сила, направленная к центру окружности (центробежная сила), однако работа равна 0, поэтому кинетическая энергия не изменяется. Благодаря этому тело может двигаться по окружности с постоянной скоростью.

Направление скорости
(= направление
перемещения)



¹⁾ Возникает вопрос: «Причём здесь скалярное произведение?» Однако работа, как и энергия, является скалярной величиной. С другой стороны, сила и перемещение — это векторные величины. Следовательно, для того, чтобы связать две векторные величины, силу и перемещение, с одной скалярной величиной, работой, необходимо применить операцию, преобразующую векторы в скаляр. Скалярное произведение векторов как раз является такой операцией.

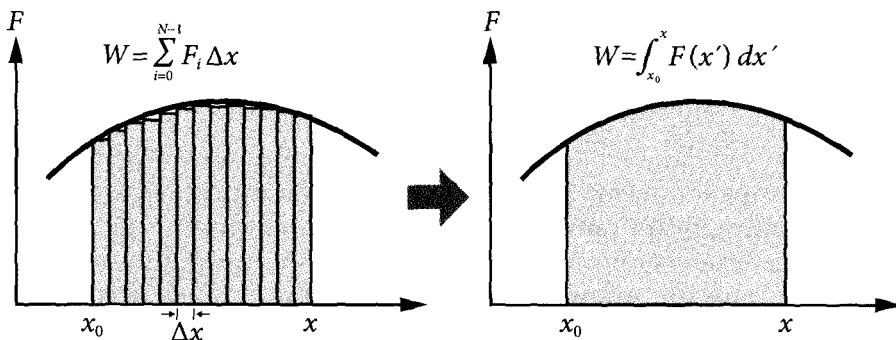
РАБОТА В СЛУЧАЕ ПЕРЕМЕННОЙ СИЛЫ (ОДНОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ)

Для постоянной силы работа была определена как

$$\text{работка} = \frac{\text{пройденный}}{\text{телом путь}} \times \frac{\text{составляющая силы}}{\text{в направлении движения}}.$$

Однако в подавляющем большинстве случаев сила, приложенная к телу, не постоянна. Тогда совершённую силой работу рассматривают, разбивая пройденный путь на короткие отрезки. Они должны быть настолько малы, чтобы в пределах этих отрезков силу можно было бы считать постоянной. Приняв длину отрезка за Δx , а силу, приложенную к телу на этом отрезке, за F_i , мы можем записать формулу изменения кинетической энергии (стр. 178):

$$\frac{1}{2}mv_{i+1}^2 - \frac{1}{2}mv_i^2 = F_i\Delta x. \quad (1)$$



Если разбить расстояние $x - x_0$ на N коротких отрезков Δx , то при $0 < i < N-1$ для каждого из них будет справедлива формула (1). Просуммировав левые и правые части N формул, получим

$$\begin{aligned} & \left(\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \right) + \left(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 \right) + \left(\frac{1}{2}mv_3^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \right) + \dots = \\ & = F_0\Delta x + F_1\Delta x + F_2\Delta x + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

После сокращения членов в левой части уравнения у нас останется

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Следовательно, формула (2) принимает вид:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = \sum_{i=0}^{N-1} F_i \Delta x.$$

Другими словами, даже если сила непостоянна, изменение кинетической энергии оказывается равно работе, совершённой над телом. Чем короче будут эти отрезки, тем с большей точностью можно считать силу, действующую на каждом из них, постоянной. Рассмотрев предел разбиения на бесконечно короткие интервалы (в этом случае количество интервалов N стремится к бесконечности), мы получим строгое математическое определение работы W в виде интеграла:

$$W = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ (N \rightarrow \infty)}} \sum_{i=0}^{N-1} F_i \Delta x = \int_{x_0}^x F(x) dx.$$

Здесь сила, действующая на тело в точке x , обозначена как $F(x)$. То есть интегрирование — это всего лишь разделение исследуемой величины на мелкие части и последующее суммирование этих частей.

В итоге правило: «Изменение кинетической энергии тела при перемещении между двумя точками равно работе, совершённой над этим телом на данном интервале». Если принять работу равной

$$W = \int_{x_0}^x F(x) dx, \quad (3)$$

можно записать:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = W. \quad (4)$$

Кроме того, связь между работой и кинетической энергией может быть выведена непосредственно из уравнения движения. Умножив левую и правую части уравнения движения

$$m \frac{dv}{dt} = F$$

на скорость v и проинтегрировав по времени от 0 до t , получим

$$\int_0^t mv \frac{dv}{dt} dt = \int_0^t Fv dt.$$

Применив для левой части формулу

$$\frac{d(v^2)}{dt} = 2v \frac{dv}{dt},$$

а для правой — $v = dx/dt$, получим

$$\int_0^t \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) dt = \int_0^t F \left(\frac{dx}{dt} \right) dt,$$

или

$$\int_{v_0}^v d \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \int_{x_0}^x F dx \quad (5)$$

Однако раньше мы приняли, что координата и скорость в моменты времени $t = 0$ и t равны x_0 , v_0 и x , v соответственно. Левая часть уравнения (5) представляет собой изменение кинетической энергии:

$$\int_{x_0}^x d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2,$$

а правая — это не что иное, как работа. Таким образом, мы вывели формулу (4). Выше для простоты было рассмотрено одномерное перемещение, но эти рассуждения применимы и для трёхмерного случая.

КОНСЕРВАТИВНЫЕ СИЛЫ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Гравитационную потенциальную энергию на высоте x можно выразить как mgx . Поставив знак и продифференцировав, мы получим

$$-\frac{d(mgx)}{dx} = -mg.$$

Правая часть уравнения — это не что иное, как сила тяжести. Обозначив

$$V = mgx \text{ и } F = -mg,$$

мы получим соотношение

$$F = -\frac{dV}{dx}. \quad (6)$$

Не только сила тяжести, но и любая другая сила, которая может быть выражена через потенциальную энергию, как в формуле (6), называется *консервативной силой*. Это название связано с тем, что для такой силы выполняется закон сохранения энергии.

На самом деле, если подставить формулу (6) в формулу для работы (3), мы получим

$$\begin{aligned} W &= - \int_{x_0}^x \frac{dV}{dx} dx' = - \int_{V(x_0)}^{V(x)} dV = \\ &= -[V(x) - V(x_0)]. \end{aligned} \quad (7)$$

Подставив это в формулу (4), описывающую связь между изменением кинетической энергии и работой, мы получим

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -[V(x) - V(x_0)],$$

т. е. выполняется закон сохранения энергии:

$$\frac{1}{2}mv^2 + V(x) = \frac{1}{2}mv_0^2 + V(x_0).$$

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ПРУЖИНЫ И СИЛЫ

В качестве другого примера консервативной силы давай рассмотрим восстанавливающую силу пружины. При растягивании (сжимании) пружины жёсткостью k на длину x из недеформированного состояния энергия упругости, накапливаемая в пружине, выражается следующим образом:

$$V = \frac{1}{2} kx^2.$$

Эту энергию упругости можно рассматривать как потенциальную энергию пружины. При этом для тела массой m , прикреплённого к пружине, выполняется закон сохранения энергии:

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} kx^2.$$

Кроме того, когда тело обладает этой потенциальной энергией, на него действует сила:

$$F = -\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2} kx^2 \right) = -kx.$$

Это не что иное, как формула восстанавливающей силы пружины.

Разумеется, если посчитать работу, совершающую при растяжении пружины с восстанавливающей силой $F = -kx$ из нерастянутого состояния на длину x , то мы получим

$$W = \int_0^x (-kx') dx' = k \left[\frac{1}{2} x'^2 \right]_0^x = \frac{1}{2} kx^2,$$

что совпадает с формулой для потенциальной энергии. Результат вполне естественный.

НЕКОНСЕРВАТИВНЫЕ СИЛЫ И ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Силы, которые не могут быть выражены с помощью потенциальной энергии, называются **неконсервативными**. Типичный пример — сила трения. Когда работает неконсервативная сила, простой закон сохранения энергии, говорящий о постоянстве суммы кинетической и потенциальной энергии тела, не выполняется. Если толкнуть тело, лежащее на поверхности стола, обладающей трением, то оно быстро остановится. Это означает, что исчезла кинетическая энергия, которой тело обладало в начале движения. Однако это не означает, что здесь «не выполняется закон сохранения энергии». Кинетическая энергия тела просто перешла на микроскопический уровень, превратившись в тепловую энергию¹⁾ движения моле-

¹⁾ Выражение «тепловая энергия» в действительности некорректно. Тепло — это переходная форма энергии, она отличается от энергии, которой обладают тела или пространство. Это аналогично тому, как работу не называют «энергией» работы.

кул. Как было отмечено на стр. 190, если включить в рассмотрение микроскопические движения молекул, то закон сохранения энергии выполняется даже в случае работы неконсервативной силы.

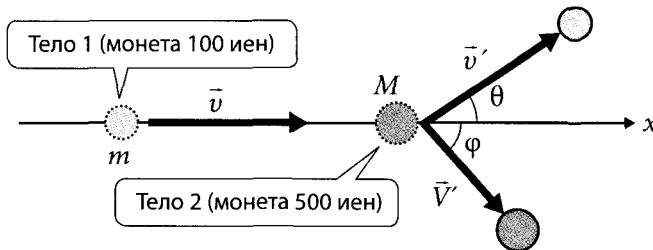
Однако при рассмотрении явлений на молекулярном уровне нельзя забывать о том, что для описания мира молекул в общем случае необходима квантовая механика, а описанные в данной книге законы движения Ньютона к микромиру не применимы. Кроме того, когда речь идёт об энергии атомных ядер, применять механику становится ещё сложнее, так как здесь в основе лежат понятия энергии, основанные на теории относительности, высшей физики ядерных реакций. Однако и в квантовой механике, и в теории относительности закон сохранения энергии всё-таки выполняется. Можно сказать, что это — основной закон природы, которому физики доверяют больше всего.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ И ЗАДАЧА СТОЛКНОВЕНИЯ МОНЕТ

В Главе 3 мы рассмотрели столкновение монет и закон сохранения импульса для двумерного случая (стр. 146). Выразив закон сохранения импульса в виде проекций импульсов на оси координат, мы получили:

$$\text{по оси } x: mv = mv' \cos\theta + MV' \cos\varphi,$$

$$\text{по оси } y: 0 = mv' \sin\theta + MV' \sin\varphi.$$



Далее, если при столкновении двух тел механическая энергия сохраняется (это называется абсолютно упругим ударом), то выполняется равенство

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mv'^2 + \frac{1}{2}MV'^2.$$

Так как в этой системе из трёх уравнений присутствуют 4 неизвестных — v' , V' , θ и φ , невозможно найти их все, но можно определить соотношение между какими-либо двумя из них. Например, определим соотношение между скоростью тела 1 после столкновения (v') и углом разлёта (θ). Для простоты положим, что $m < M$ (случай столкновения монет 100 и 500 иен как раз соответствует этому условию). Для начала подстановкой уравнений, полученных разрешением двух

формул закона сохранения импульса относительно $\cos\phi$ и $\sin\phi$, в соотношение $\sin^2\phi + \cos^2\phi = 1$, мы можем избавиться от ϕ . Сделав это, мы получим выражение¹⁾

$$V'^2 = \left(\frac{m}{M}\right)^2(v^2 - 2vv'\cos\theta + v'^2).$$

Подставив его в формулу закона сохранения импульса, получим:

$$v' = \frac{(m/M)\cos\theta + \sqrt{1-(m/M)^2\sin^2\theta}}{1+m/M} v. \quad (8)$$

Кстати, если в этом выражении принять $\theta = 0$, то окажется, что $v = v'$. Это соответствует случаю, когда тело 1 прошло мимо тела 2, не столкнувшись с ним.

С другой стороны, если тело 1 было отброшено в противоположном направлении, т. е. $\theta = \pi$, то мы получим

$$v' = \frac{1-m/M}{1+m/M} v.$$

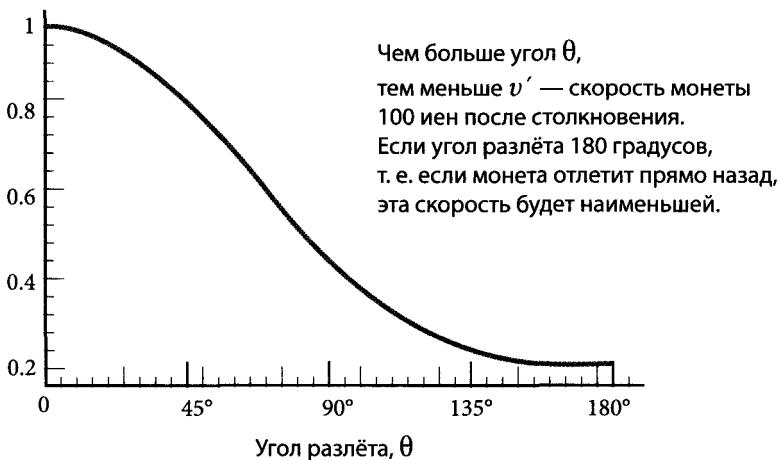
Если в этой формуле принять $M \gg m$, то она будет приближаться к выражению²⁾ $v' = v$. Это означает, что при лобовом столкновении тела малой массы с более массивным телом, первое будет отброшено с такой же скоростью. С другой стороны, в случае $M = m$ окажется, что $v' = 0$. В этом можно убедиться, если заменить 500-иеновую монету 100-иеновой и попробовать столкнуть их так, чтобы после удара они не разлетались под углом. При этом ударившая 100-иеновая монета остановится, а 100-иеновая монета, которая первоначально покоялась, отлетит с такой же скоростью. В этом случае $V' = v$, что также можно легко понять из формулы для V^2 .

Попробуем представить зависимость отношения скоростей монеты 100 иен до и после столкновения v'/v от угла разлёта θ в виде графика. Так как масса монеты 100 иен равна 4,8 г, а монеты 500 иен — 7,0 г, значит, отношение $m/M = 4.8/7.0 \approx 0.69$. Подставив это значение в выражение (8) и произведя вычисления, мы получим нижеприведённый график.

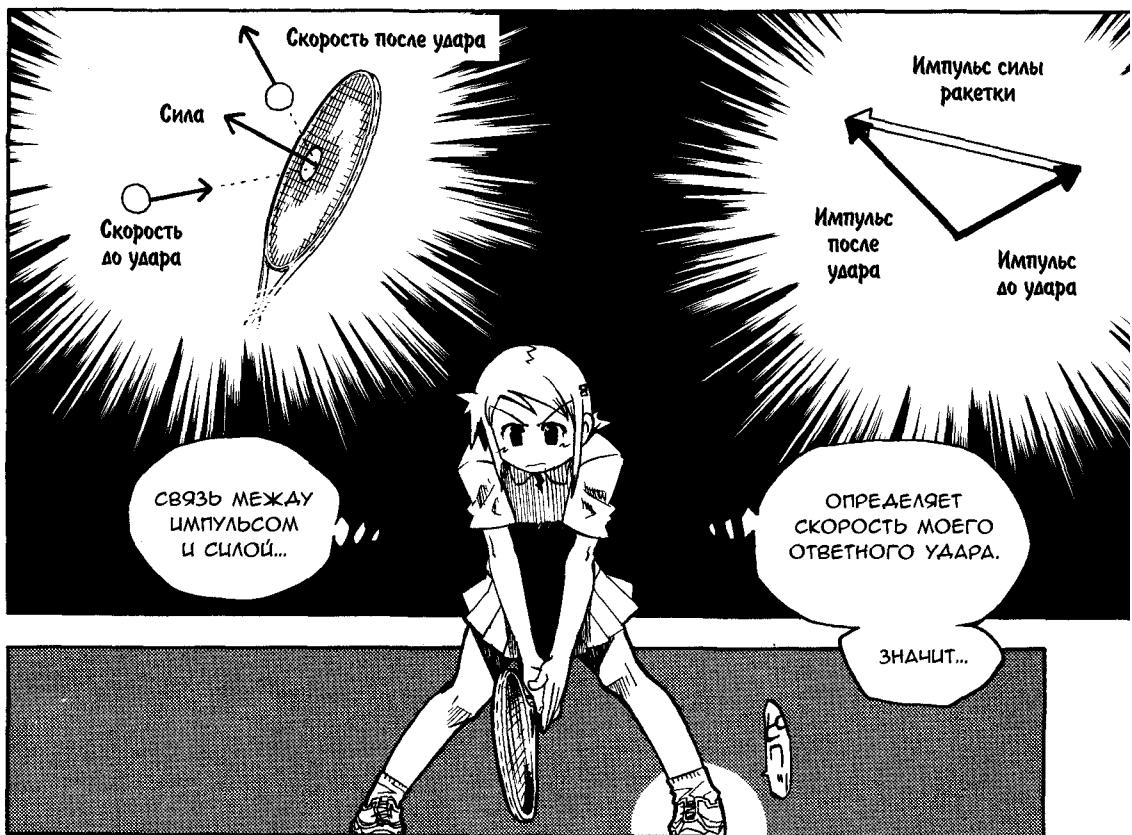
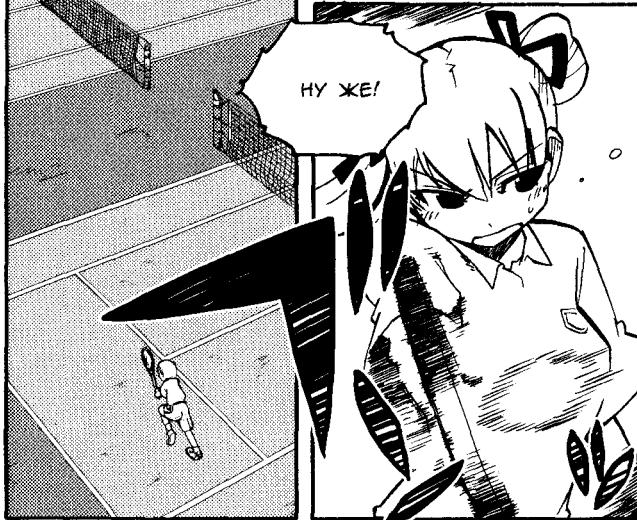
¹⁾ Это выражение также можно получить, если изобразить векторную схему для закона сохранения импульса $\vec{m}\vec{v} = \vec{m}\vec{v}' + \vec{M}\vec{V}$ и применить теорему косинусов к треугольнику, образованному векторами.

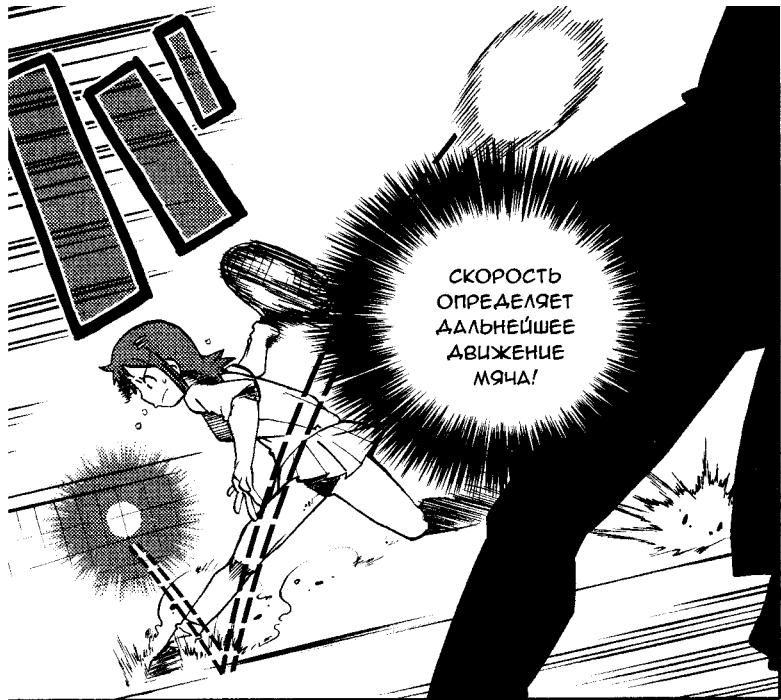
²⁾ Рассматривая случай $M \gg m$ непосредственно в выражении (8), мы получим такое же приближённое соотношение $v' = v$.

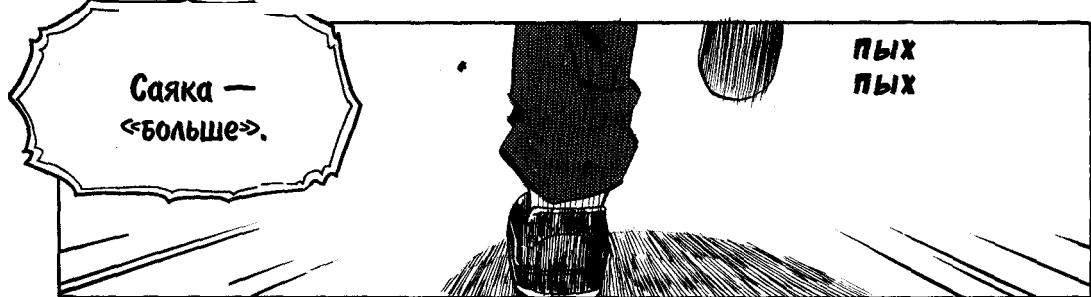
Отношение скоростей, v'/v

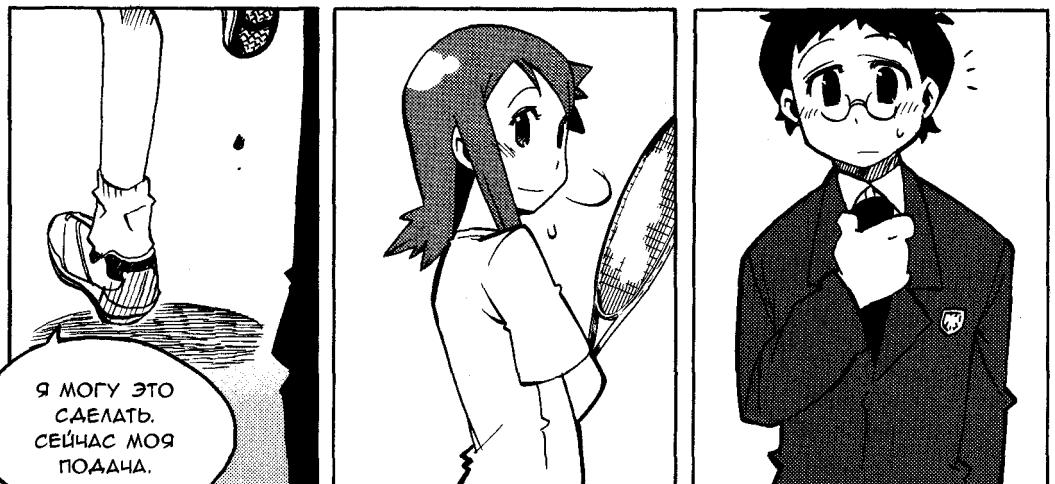
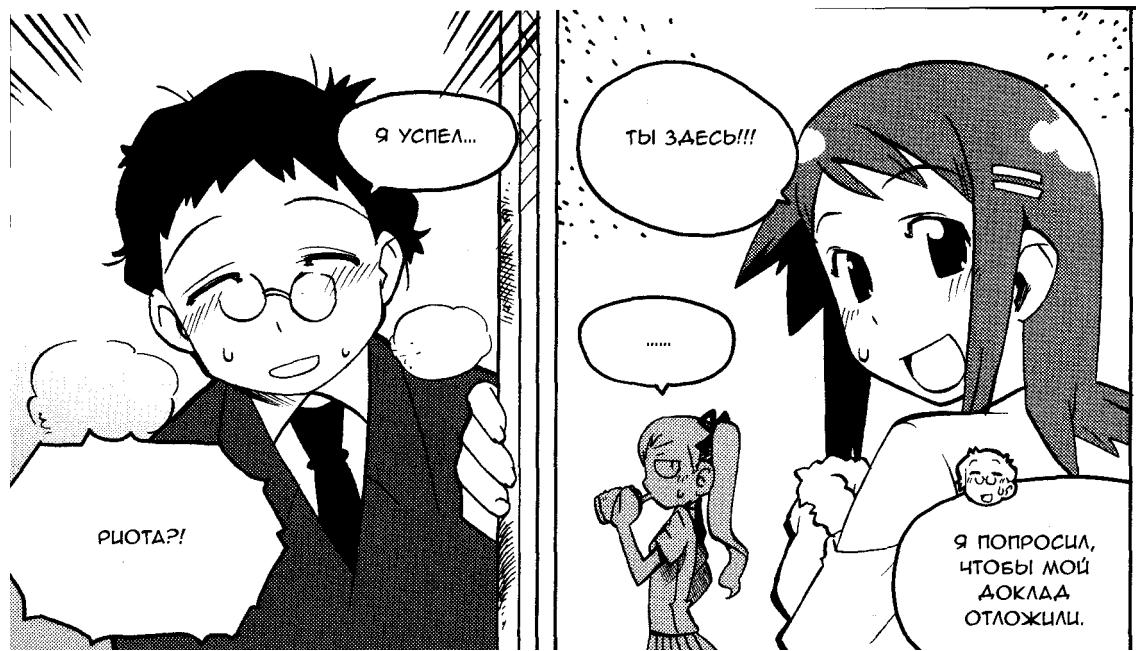


ЭПИЛОГ МАТЧ МЕГУМИ И САЯКИ

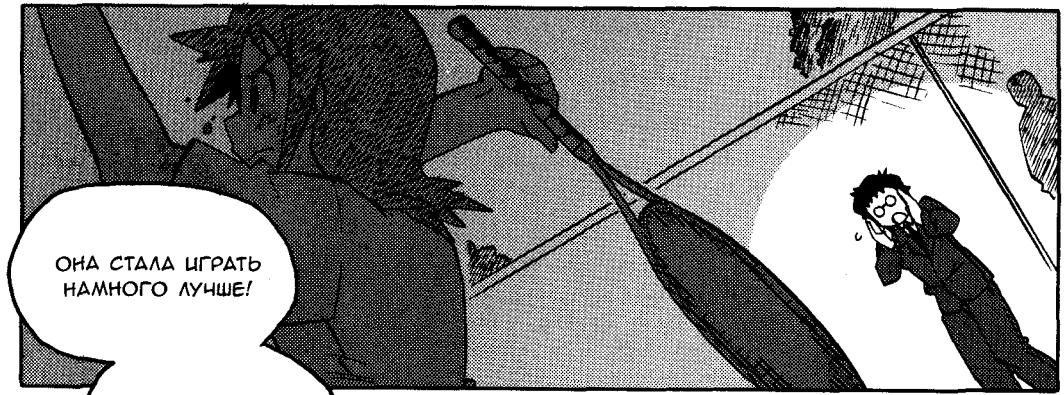
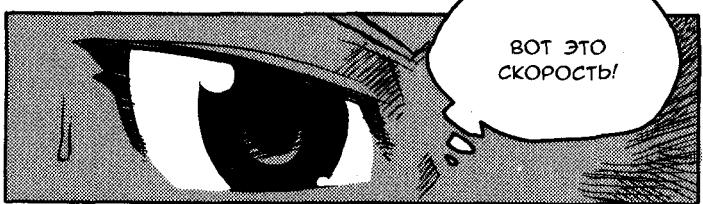


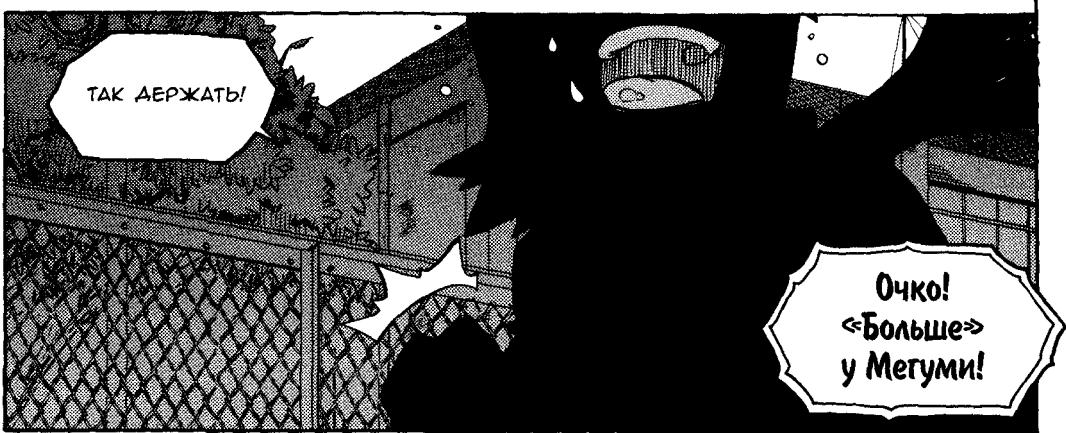












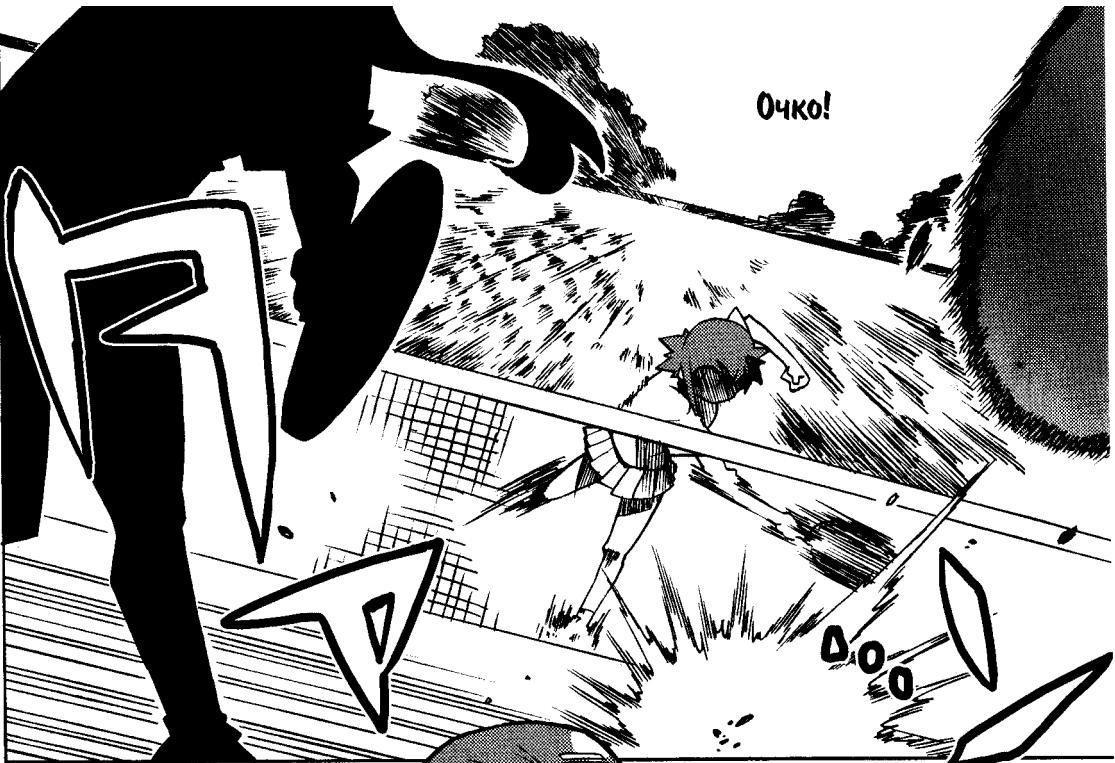


Я ОТЛИЧНО
ПОМНЮ ТВОИ
УРОКИ, РИОТА.

СДЕЛАТЬ ТЕЛО
ГИБКИМ!

ПРИЛОЖИТЬ КАК
МОЖНО БОЛЬШУЮ
СИЛУ В МОМЕНТ
УДАРА РАКЕТКИ
ПО МЯЧУ!

Очко!



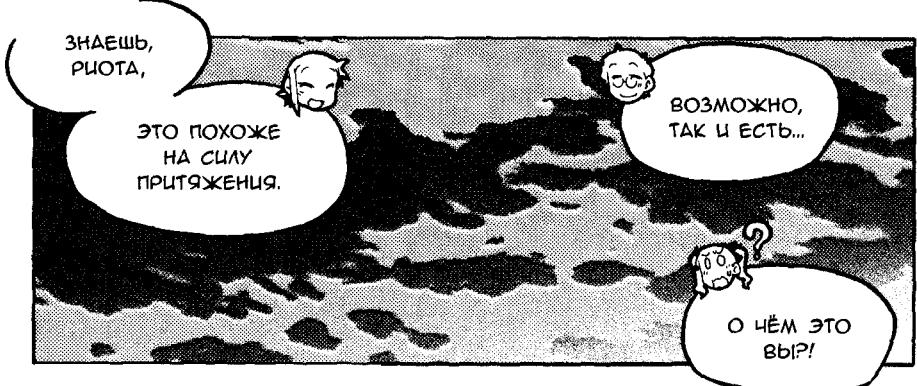
Гейм, сет,
матч!

Победила
Мегуми!

я...

Я СДЕЛАЛА ЭТО!
Я ПОБЕДИЛА,
РИОТА!

ЧТО?



ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

абсолютная величина — 89
- вектора — 37

Б

баланс сил — 40
блок — 171

В

вектор — 21, 37, 42, 64, 87, 145
- абсолютная величина — 37
- нулевой — 38
- отрицательный — 38
- параллельный перенос — 37
- разность — 39
- сумма — 38
- умножение — 39
векторная величина — 21, 139
векторная скорость — 51
векторная физическая величина — 37

величина
- абсолютная — 89, 37
- векторная — 21, 139
- скалярная — 91
- физическая — 37

вес — 23-26, 61, 70

восстанавливающая сила — 209

времени интервал — 100

временной интервал — 101

время — 49, 52, 56, 75, 87, 99, 112-113, 116-117, 130

всемирное тяготение — 32, 44

- закон — 32, 44, 96

вторая производная — 101
высота — 172, 193-196, 204

Г

гравитационная масса — 94
гравитационная постоянная — 44
гравитационная потенциальная
энергия — 166, 203, 208
график — 56-57, 75, 87, 117, 149, 211

Д

движение — 10
- равномерное прямолинейное — 48, 91
- равноускоренное — 53, 58, 76, 87, 98, 102, 179
- ракеты — 147
- ускоренное — 91
действия и противодействия закон
— 4, 15, 19, 23, 27, 30, 33, 41, 95, 122, 125, 142-143, 145
джоуль — 161, 200
дифференциальное уравнение — 101

Е

единица
- времени — 51
- длины — 51
- импульса — 144
- массы — 200
- работы — 200
- силы — 44, 94, 119
- скорости — 51, 200
- энергии — 161, 200

Ж

жёсткость — 209

З

закон

- всемирного тяготения — 32, 44, 96
 - действия и противодействия — 4, 15, 19, 23, 27, 30, 33, 41, 95, 122, 125, 142-143, 145
 - инерции — 41, 67, 84
 - коммутативности — 38
 - Ньютона второй — 41, 60, 71, 91, 111, 115, 139, 140
 - Ньютона первый — 41, 60, 62, 67, 91
 - Ньютона третий — 4, 33, 41, 43, 120
 - переместительный — 38
 - сохранения импульса — 122, 125, 127, 141, 143, 145, 148, 210
 - сохранения механической энергии — 184, 189, 191-192, 195
 - сохранения энергии — 156, 208-210
 - ускорения — 41, 68
- законы механики Ньютона — 33
- значение силы численное — 21

И

- изменение импульса — 111, 115, 119, 122, 130, 133, 136, 139, 140, 142
- изменение скорости — 52, 83, 87, 92, 112
- импульс — 106-107, 109-110, 114, 117-118, 129, 139, 159, 160, 162, 213
- изменение — 111, 115, 119, 122, 130, 133, 136, 139, 140, 142
 - сохранение — 120, 126
- импульс силы — 104, 111, 113, 115, 130, 133, 136, 139-140, 142
- импульс системы полный — 125
- импульс тела — 104, 107, 120, 139, 140
- инерции закон — 41, 67, 84
- инерционная масса — 94

интеграл — 102, 148, 207

интервал времени — 100

интервал временной — 101

К

- калория — 200
- квадратичная функция — 99
- квантовая механика — 209
- киловатт-час — 161
- килограмм-сила — 119
- килокалория — 161, 200
- кинетическая энергия — 155-160, 162-163, 165, 175, 178-179, 184-185, 187, 189, 192, 200, 203, 205, 207-208
- классическая механика — 34
- количество движения — 107
- коммутативности закон — 38
- консервативная сила — 208
- координаты — 99
- круговая орбита — 97

М

- масса — 32, 44, 71, 74, 91, 94, 107, 109-110, 112, 114, 118, 127, 139, 144, 147, 148, 159, 162, 172, 178, 180, 210
- гравитационная — 94
 - Земли — 96
 - инерционная — 94
 - точечная — 42
 - этalon — 95
- механика
- квантовая — 209
- классическая — 34
 - механическая энергия — 210
- модуль — 37
- силы — 89

Н

наклонная плоскость — 171

направление

- силы — 21, 22, 77, 92
- скорости — 92
- ускорения — 92
- натяжение нити — 61, 89
- начальная скорость — 98
- неконсервативная сила — 209
- нулевой вектор — 38
- ニュютон — 44, 94, 119, 144, 200
- Ньютон, Иссак
 - второй закон — 41, 60, 71, 91, 111, 115, 139-140
 - законы механики — 33
 - первый закон — 41, 60, 62, 67, 91
 - третий закон — 4, 33, 41, 43, 120

О

- орбита круговая — 97
- орбита эллиптическая — 97
- отрицательная работа — 170, 177, 205
- отрицательное ускорение — 53, 69
- отрицательный вектор — 38

П

- парабола — 93
- параллелограмма правило — 64, 87
- параллельный перенос вектора — 37
- переменная сила — 206
- переменная скорость — 53-54
- переместительный закон — 38
- перемещение — 49, 100, 205
- перенос вектора параллельный — 37
- плоскость наклонная — 171
- поднимающая сила — 201-202
- полная механическая энергия — 195
- полный импульс системы — 125
- положения энергия — 155, 164
- положительная работа — 170, 176, 205
- постоянная гравитационная — 44
- постоянная скорость — 54
- потенциал — 164, 166

- потенциальная энергия — 155, 158, 164-165, 169-170, 184-185, 187, 189, 192, 195, 203, 209
- гравитационная — 166, 208
- правило параллелограмма — 64, 87
- принцип сохранения работы — 171
- принцип эквивалентности — 95
- притяжения сила — 44
- произведение скалярное — 205
- производная — 100
- вторая — 101
- путь тормозной — 180-183

Р

- работа — 167-169, 175, 178-179, 201, 206
- отрицательная — 170, 177, 205
- положительная — 170, 176, 205
- равновесие — 20, 22-23, 27
- сил — 21, 23, 89
- равнодействующая сила — 40, 42, 60, 63
- равномерное прямолинейное движение — 48, 91
- равноускоренное движение — 53, 58, 76, 87, 98, 102, 179
- радиус Земли — 96
- разделение тел — 143
- разложение сил — 89
- разность векторов — 39
- ракеты движение — 147
- расстояние — 48, 56, 87, 167
- результатирующая сила — 26, 39, 61

С

- свободного падения ускорение — 82, 95-96, 172
- сила — 3-4, 6, 18, 29, 74, 80, 91, 94, 112-113, 139, 167, 170, 175-178, 205
- баланс — 40
- восстанавливающая — 209

- импульс — 104, 111, 113, 115, 130, 133, 136, 139, 140, 142
- консервативная — 208
- направление — 21-22, 77, 92
- неконсервативная — 209
- переменная — 206
- поднимающая — 201-202
- притяжения — 44
- равновесие — 21, 23, 89
- равнодействующая — 40, 42, 60, 63
- разложение — 89
- результирующая — 26, 39, 61
- сложение — 87-88
- торможения — 180-181
- трения — 209
- тяжести — 22-23, 25-27, 42, 63, 79, 89, 93-95, 97, 172, 200-202
- центростремительная — 205
- скаляр — 37
- скалярная величина — 91
- физическая — 37
- скалярное произведение — 205
- скорость — 3, 48, 56, 68, 80, 87, 93, 98, 100, 107, 110, 114, 118, 127, 139, 144, 147-148, 159, 162, 178, 180-181, 193-196, 204, 211, 213
- векторная — 51
- изменение — 52, 83, 87, 92, 112
- направление — 92
- начальная — 98
- переменная — 53-54
- постоянная — 54
- сложение сил — 87-88
- соединение тел — 143
- сопротивление воздуха — 190, 197
- состояние стационарное — 25
- сохранение импульса — 120, 126
- закон — 122, 125, 127, 141, 143, 145, 148, 210
- сохранения механической энергии
- закон — 184, 189, 191-192, 195
- сохранения работы принцип — 171

- сохранения энергии закон — 156, 208-210
- стационарное состояние — 25
- сумма векторов — 38
- сумма импульсов — 120

Т

- тела импульс — 104, 139-140
- теория относительности — 210
- тепловая энергия — 155, 157, 209
- торможения сила — 180-181
- тормозной путь — 180-183
- точечная масса — 42
- траектория — 93
- траектория движения — 92
- трение — 197
- сила — 209
- тяготение всемирное — 32, 44
- тяжести сила — 23, 25-27, 42, 63, 79, 89, 93-95, 97, 172, 200-202
- тяжести центр — 43

У

- угол разлёта — 210, 212
- умножение векторов — 39
- упругости энергия — 166, 203, 209
- уравнение дифференциальное — 101
- ускорение — 48, 52, 68, 70, 74, 80, 87, 91, 94, 98, 100, 112, 139
- закон — 41, 68
- направление — 92
- отрицательное — 53, 69
- свободного падения — 82, 95-96, 172
- ускоренное движение — 91

Ф

- физика — 34
- ядерных реакций — 210
- физическая величина — 37
- векторная — 37
- скалярная — 37
- функция квадратичная — 99

Х

химическая энергия — 155, 157

Ц

центр масс — 43

центр тяжести — 43

центростремительная сила — 205

Ч

численное значение силы — 21

Э

эквивалентности принцип — 95

электрическая энергия — 155-157

электростатического поля энергия — 203

эллиптическая орбита — 97

энергия — 153, 175

- кинетическая — 155-160, 162-163, 165, 175, 178-179, 184-185, 187, 189, 192, 200, 203, 205, 207-208

- механическая — 210
 - механическая полная — 195
 - положения — 155, 164
 - потенциальная — 155, 158, 164-166, 169, 170, 184-185, 187, 189, 192, 195, 203, 209
 - потенциальная гравитационная — 166, 203, 208
 - света — 156
 - тепловая — 155, 157, 209
 - упругости — 166, 203, 209
 - химическая — 155, 157
 - электрическая — 155-157
 - электростатического поля — 203
 - ядерная — 155
- эталон массы — 95

Я

ядерная энергия — 155

ядерных реакций физика — 210



Хидео Нитта (автор), Кейта Такацу (художник)

Занимательная физика. Механика. Манга

Главный редактор В. М. Халикеев
Научный редактор И. А. Сенников
Верстальщик А. Ю. Анненков

Подписано в печать 01.12.2010. Формат 70x90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объём 15 п. л. Усл. п. л. 17,5. Тираж 1500 экз.
Код MNG-MECH. Заказ №0-1758.

Издательский дом «Додэка-ХХ1»
ОКП 95 3000
105318 Москва, а/я 70
Тел./факс: (495) 366-04-56, 365-26-95
E-mail: red@dodeca.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала ОАО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресо
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.



Приставки единиц измерения в СИ

Обозначение	Название	Множитель	Обозначение	Название	Множитель
да	дека-	10	д	деци-	$1/10$
г	гекто-	100	с	санти-	$1/100$
к	кило-	1000	м	милли-	$1/1000$
М	mega-	10^6	мк	микро-	10^{-6}
Г	гига-	10^9	н	нано-	10^{-9}
Т	тера-	10^{12}	п	пико-	10^{-12}
П	пета-	10^{15}	ф	фемто-	10^{-15}
Э	экса-	10^{18}	а	атто-	10^{-18}
З	зетта-	10^{21}	з	зепто-	10^{-21}
И	иотта-	10^{24}	и	иокто-	10^{-24}



Греческий алфавит

Прописная	Строчная	Название	Прописная	Строчная	Название
А	α	альфа	Н	ν	ню
В	β	бета	Ξ	ξ	кси
Г	γ	гамма	О	ο	омикрон
Δ	δ	дельта	Π	π	пи
Е	ε	эpsilon	Ρ	ρ	ро
Ζ	ζ	дзета	Σ	σ	сигма
Η	η	эта	Τ	τ	тай
Θ	θ	тета	Υ	υ	ипсилон
Ι	ι	йота	Φ	φ	фи
Κ	κ	каппа	Х	χ	хи
Λ	λ	лямбда	Ψ	ψ	пси
Μ	μ	мю	Ω	ω	омега



ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА МЕХАНИКА МАНГА

ЭТУ ЗАНЯТНУЮ КНИГУ НИКАК НЕ НАЗОВЁШЬ УЧЕБНИКОМ ФИЗИКИ, ХОТЯ В НЕЙ, КАК И ПОЛОЖЕНО ДОБРОПОРЯДОЧНОМУ УЧЕБНИКУ, ВВОДЯТСЯ ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КЛАССИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ. КАЖДАЯ ГЛАВА КНИГИ НАЧИНАЕТСЯ КОМИКСАМИ, А ЗАКАНЧИВАЕТСЯ ПОВТОРЕНИЕМ И УТОЧНЕНИЕМ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАНИЙ. ВМЕСТО СУХИХ ФОРМУЛ И ПРИМИТИВНЫХ ПРИМЕРОВ ЗДЕСЬ ГЕРОИ КНИГИ РЕШАЮТ СВОИ "ЖИВОТРЕПЕЩУЩИЕ" ПРОБЛЕМЫ. СИМПАТИЧНЫЙ ПРИЗЁР ОЛИМПИАДЫ ПО ФИЗИКЕ РИОТА ОБЪЯСНЯЕТ СВОЕЙ ОДНОКЛАССНИЦЕ-СПОРТСМЕНКЕ И НЕИСПРАВИМОЙ ФАНТАЗЁРКЕ МЕГУМИ, ПОЧЕМУ ЕЙ НЕ УДАЁТСЯ ИГРА В ТЕННИС. ТОГДА-ТО И ВЫясняется, что игра в теннис, прыжки в высоту, езда на велосипеде, — везде снуют эти "сторонние парни" из учебника физики — СИЛА, ИМПУЛЬС, ЭНЕРГИЯ и др. Так ненавязчиво ты вместе с Мегуми узнаешь о повсеместном влиянии законов движения и закона всемирного тяготения Ньютона, закона сохранения импульса, закона сохранения энергии. Ты познакомишься с векторами, векторными диаграммами и их свойствами, со способами передвижения в космосе, с методами расчёта расстояний с помощью графиков, при этом ты, возможно неожиданно для себя обнаружишь, что, оказывается, умеешь вычислять интегралы.

КНИГА БУДЕТ ПОЛЕЗНА УЧАЩИМСЯ СТАРШИХ КЛАССОВ (АА И МЛАДШИЕ ШКОЛЬНИКИ ПРОЧТУТ ЕЁ С ЦЕНТЕРЕСОМ), СТУДЕНТАМ ВУЗОВ, А ТАКЖЕ ВСЕМ, КТО ЦЕНТЕРЕСУЕТСЯ ФИЗИКОЙ И ХОЧЕТ, ЧТОБЫ ОБУЧЕНИЕ БЫЛО ЛЁГКИМ И УВЛЕКАТЕЛЬНЫМ.

ISBN 978-5-94120-229-4

9 785941 202294