ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА МАНГА

МЕХАНИКА

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

ДОДЭКА
www.dodeca.ru
Ohmsha

Соотношение между физическими величинами и их единицами в классической механике

Расстояние (длина) [м] Время[с] Масса [кг] **Основные единицы**

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

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

Уравнение движения

Сила [кг·м/с^2] = Масса [кг] × Ускорение [м/с^2]

[кг·м/с^2] = [Н] (ньютон)

Импульс [кг·м/с] = Масса [кг] ×Скорость [м/с]

Импульс силы [Н·с] = Сила [Н]× Время [с]

[Н·с] = [кг·м/с^2·с] = [кг·м/с]

Работа [Н·м] = Сила [Н]× Расстояние [м]

[Н·м] = [кг·м^2/с^2] = [Дж] (Джоуль)

Кинетическая энергия — [кг·м^2/с^2] = $\frac{1}{2}$× Масса [кг] × (Скорость)^2 [(м/с)^2]

[кг·м^2/с^2] = [Дж] (Джоуль)

Занимательная физика

МЕХАНИКА

Манга

ДОДЭКА

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

Ohmsha

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.

Н69 Занимательная физика. Механика. Манга / Хидео Нитта, Кейта Такацу (худож.) ; пер. Анненкова М. А. — М. : Додэка-XXI, 2011. — 240 с. : *ил.* — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. *л.* яп. — ISBN 978-5-94120-229-4.

I. 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

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.)

СОДЕРЖАНИЕ

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, удался 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 редкции издательства Ohmsha, сценаристу re_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

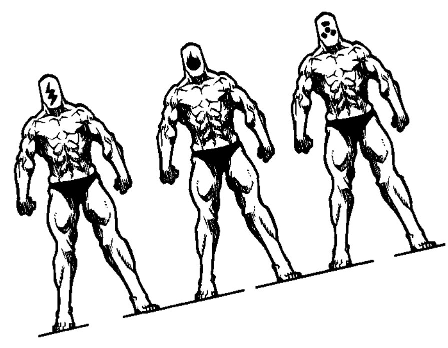
Любит спорт, а также
мечтать и подшучивать.
Подруги называют её Мегу,
а Риота — уважительно Наномия-сан.

Риота Наномура

Любит физику, серебрянный 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.



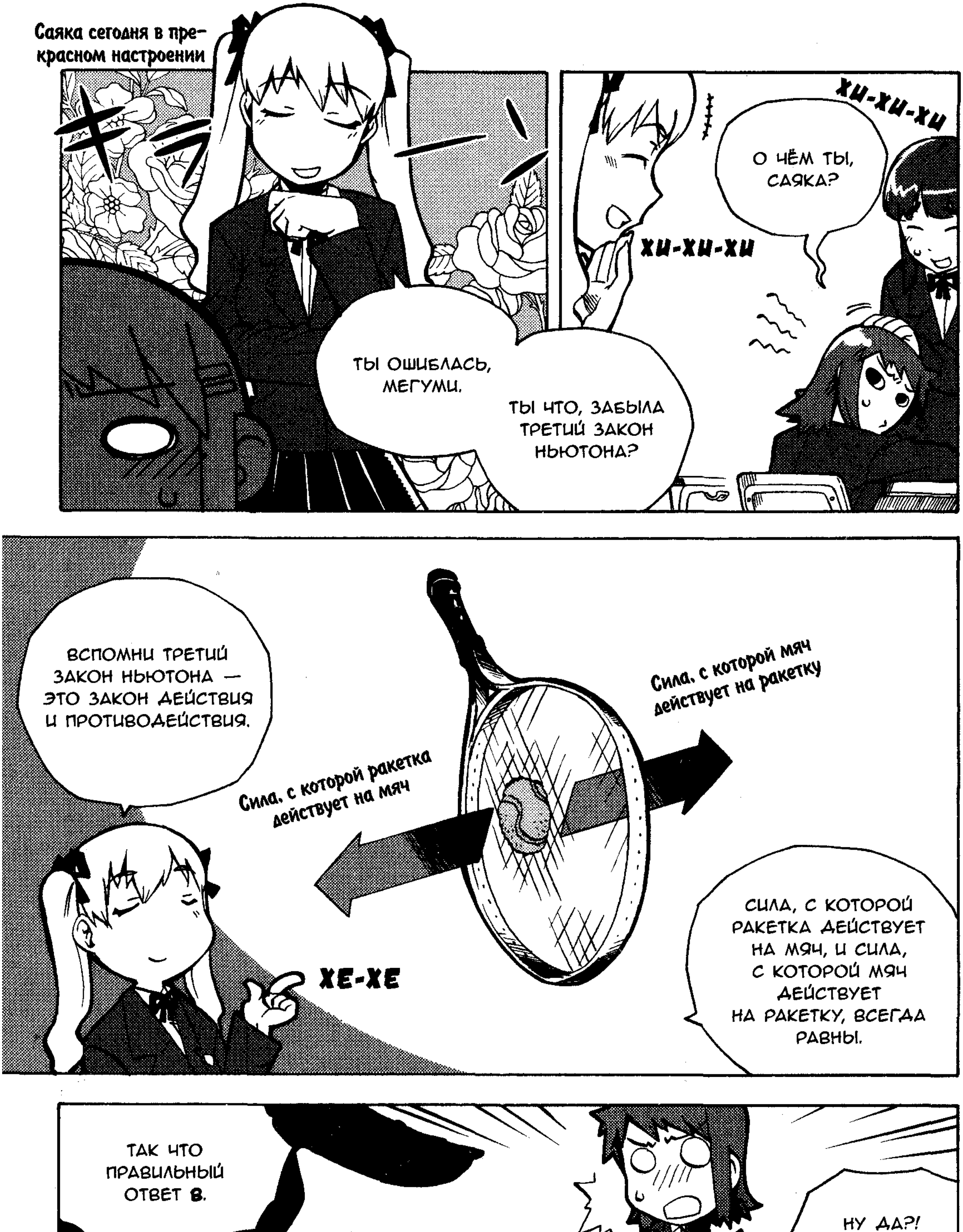
Странные парни

из учебника физики


ПРОЛОГ
ИГРАЯ В ТЕННИС, ДУМАЕШЬ ЛИ ТЫ О ФИЗИКЕ?


Ш-Ш!
ПЭНГ!
Ш-Ш!
ПЭНГ!
БАМ!
ЧТО ОНА ДЕЛАЕТ?
ВЖИК!
БАМ!
УХ!
ВНИМАТЕЛЬНЕЕ, МЕГУМИ, ВНИМАТЕЛЬНЕЕ!
ВСЁ ВНИМАНИЕ НА ИГРУ!


За несколько часов до игры...
НУ КАК! НА ВСЕ ВОПРОСЫ ОТВЕТИЛ?
ДАВАЙ СРАВНИМ ОТВЕТЫ.
Э-Э-Э... НУ, ТОГДА
СКАЖИ, КАК ТЫ ОТВЕТИЛ НА ДЕВЯТЫЙ ВОПРОС?
9) Предположим, Вы ударяете теннисной ракеткой по мячу. Что больше: сила, с которой мяч отталкивает ракетку, или сила, с которой ракетка отталкивает мяч?
А. Сила, с которой ракетка отталкивает мяч, больше силы, с которой мяч отталкивает ракетку.
Б. Сила, с которой мяч отталкивает ракетку, больше силы, с которой ракетка отталкивает мяч.
В. Сила, с которой ракетка отталкивает мяч, и сила, с которой мяч отталкивает ракетку, равны.
Г. Связь между силой, с которой ракетка отталкивает мяч, и силой, с которой мяч отталкивает ракетку, зависит от массы ракетки и скорости мяча.
ПРАВИЛЬНЫЙ ОТВЕТ В.
ПОЧЕМУ?
О НЕТ... Я ВЫБРАЛА А.


Саяка сегодня в прекрасном настроении
О ЧЁМ ТЫ, САЯКА?
ХИ-ХИ-ХИ
ХИ-ХИ-ХИ
ТЫ ОШИБЛАСЬ, МЕГУМИ.
ТЫ ЧТО, ЗАБЫЛА ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА?
ВСПОМНИ ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА — ЭТО ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.
Сила, с которой мяч действует на ракетку
Сила, с которой ракетка действует на мяч
ХЕ-ХЕ
СИЛА, С КОТОРОЙ РАКЕТКА ДЕЙСТВУЕТ НА МЯЧ, И СИЛА, С КОТОРОЙ МЯЧ ДЕЙСТВУЕТ НА РАКЕТКУ, ВСЕГДА РАВНЫ.
ТАК ЧТО ПРАВИЛЬНЫЙ ОТВЕТ В.
НУ ДА?!

КСТАТИ, МЫ ХОТЕЛИ ПОИГРАТЬ В ТЕННИС ПОСЛЕ УРОКОВ.
ТЫ СЛУЧАЕМ НЕ ЗАБЫЛА?
БАХ!
НУ ЧТО Ж...
КОНЕЧНО, НЕ ЗАБЫЛА!
...ТОГДА...
ЩЁЛК
... ПОСТАРАЙСЯ НЕ...
...ПРОВАЛИТЬСЯ ХОТЯ БЫ ЗДЕСЬ!
ХИ-ХИ-ХИ
НУ НЕ ЗЛИСЬ ЖЕ, СПОКОЙНЕЕ, МЕГУМИ.
ГР-Р-Р-Р...
ТЕРПЕТЬ НЕ МОГУ ЭТУ ЗАДАВАКУ!
БАМ
Очко!
ЧТО ТАКОЕ?


ПЭНГ!
О НЕТ. НИКАК НЕ МОГУ СОСРЕДО-ТОЧИТЬСЯ.
Я...
Я ПРОСТО НЕ МОГУ ВЫКИНУТЬ ЭТО ИЗ ГОЛОВЫ...
БАМ!
СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА МЯЧ, ДОЛЖНА БЫТЬ БОЛЬШЕ!
ДОЛЖНА БЫТЬ...
Сетка!
ВЖИК!
ЕСЛИ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РАКЕТКУ И НА МЯЧ, РАВНЫ...


БУМ!
ОЙ!
УФ!
УФ!
БАМ!
ЕСЛИ ОНИ РАВНЫ...
АЙ — АЙ — АЙ!
РАЗВЕ ОНИ НЕ УРАВНОВЕСЯТ ДРУГ ДРУГА?..
... НО ТОГДА МЯЧ НЕ БУДЕТ ДВИГАТЬСЯ? В ЭТОМ НЕТ СМЫСЛА!
Гейм, сет, матч!
Победила Саяка!
ОТЛИЧНО! ПРОИГРАВШИЙ УБИРАЕТ КОРТ.
ХИ-ХИ-ХИ
ХЕ-ХЕ
НЕПОНЯТ-НО!
ОХ!

Позже этим же днем...
И САЯКЕ ПРОИГРАЛА...
...
И КОНТРОЛЬНУЮ ЗАВАЛИЛА,
И ДО СИХ ПОР НЕ ПОНИМАЮ...
ВЖИК!
БАЦ!
ОЙ!
АЙ, БОЛЬНО!
ОЙ, ПРОСТИ!
МОЙ ОДНОКЛАССНИК РИОТА НОНОМУРА?


ЗНАМЕНИТЫЙ НОНОМУРА, КОТОРЫЙ ЗАВОЕВАЛ СЕРЕБРЯНУЮ МЕДАЛЬ
НА МЕЖДУ-НАРОДНОЙ ОЛИМПИАДЕ ПО ФИЗИКЕ!
ТАК, ПОСТОЙ... ЗАЧЕМ ТЫ...
НУ, ЭЭЭ... Я УВИДЕЛ МЯЧ У СЕБЯ ПОД НОГАМИ...
... ПОДУМАЛ, ЧТО МОГ БЫ ПОМОЧЬ, И ХОТЕЛ БРОСИТЬ ЕГО В КОРЗИНУ.
НО Я ТАКОЙ НЕЛОВКИЙ.
ЛУЧШЕ БЫ ТЫ ПРОСТО ПЕРЕДАЛ ЕГО МНЕ, КАК ЭТО ДЕЛАЮТ НОРМАЛЬНЫЕ ЛЮДИ.
ДА... НАВЕРНОЕ, ТЫ ПРАВА.


НО НИЧЕГО СТРАШНОГО, ТЫ ВЕДЬ НЕ НАРОЧНО.
А ЧТО ТЫ ВООБЩЕ ЗДЕСЬ ДЕЛАЕШЬ?
Я РАССЧИТЫВАЛ ДВИЖЕНИЕ МЯЧА, ПОКА СМОТРЕЛ ЗА ВАШЕЙ ИГРОЙ.
Эффект Мануса
$m\frac{d^2y}{dt^2} =$
$-mg+$
УХ ТЫ! ЧЕГО ЖЕ ЕЩЁ ОЖИДАТЬ ОТ СЕРЕБРЯНОГО ПРИЗЁРА ОЛИМПИАДЫ ПО ФИЗИКЕ?!
ЗНАЧИТ... ТЫ ВИДЕЛ, КАК Я ПРОИГРАЛА ЭТОЙ ПРОТИВНОЙ САЯКЕ!
НУ ДА.
ГР-Р-Р-Р-Р-Р-Р!
ТОГДА СЛУШАЙ ВНИМАТЕЛЬНО!
ЗНАЕШЬ, ПОЧЕМУ Я ПРОИГРАЛА?..
ПФФ!
О ЧЁМ ТЫ?
ХВАТЬ!


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.
Я СОВСЕМ НЕ МОГЛА СО-СРЕДОТОЧИТЬ-СЯ НА ИГРЕ.
МОГУ Я ПОПРО-СИТЬ?
НОНОМУРА-КУН, ПОМОЖЕШЬ МНЕ РАЗОБРАТЬСЯ В ФИЗИКЕ?
ХЛ-ОП!
ПОЧЕМУ Я?!
ДР-Р
ДР-Р
У ТЕБЯ ЖЕ СЕРЕБРЯНАЯ МЕДАЛЬ. РАЗВЕ НЕТ? ПОЖАЛУЙСТА, ПОМОГИ МНЕ!

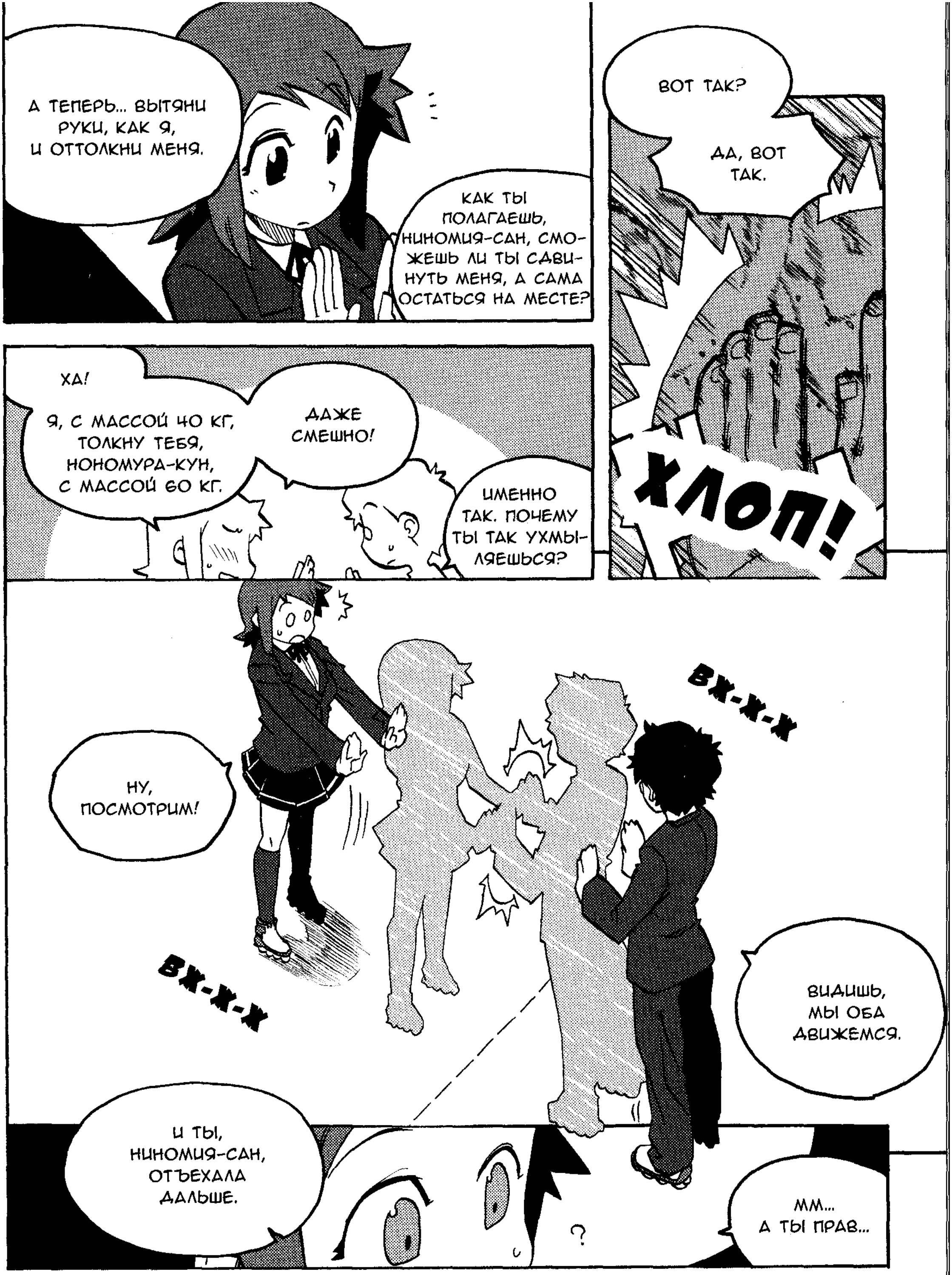

...
ХМ...
НО...
ОЙ, ОЙ!
ТАК БОЛЬНО!
ЭТО ВСЁ
ОТ ТВОЕГО
МЯЧА.
О-О-ОХ...
ЧТО? А ПОЧЕМУ
ТЫ ДЕРЖИШЬСЯ
ЗА ЖИВОТ?
ВЕДЬ Я ПОПАЛ
В ГОЛОВУ!
НУ, ХОРОШО!
ТАК И БЫТЬ,
Я ПОМОГУ ТЕБЕ!
ПРАВДА?
ДОГОВОРИЛИСЬ!
НО ТЫ МНЕ
ДОЛЖНА
ПООБЕЩАТЬ, ЧТО
БУДЕШЬ СТАРАТЬСЯ
ИЗО ВСЕХ СИЛ.

1 ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

1.1. ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ

КАК РАБОТАЕТ ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ


...ДАВАЙ-КА ПОСМОТРИМ, КАК РАБОТАЕТ ЭТОТ ЗАКОН НА НАШИХ ТЕЛАХ.
НА НАШИХ ТЕЛАХ?
ДА, НА НАШИХ ТЕЛАХ.
НА ЧТО ЭТО ОН НАМЕКАЕТ?
...НЕТ, НЕТ, ТЫ МЕНЯ НЕ ТАК ПОНЯЛА.
ШУРХ-ШУРХ
ШУРХ-ШУРХ
ЭТО... РОЛИКИ?!
ПРОСТО НАДЕНЬ ИХ.
ЧТО?
ОП-ПА! ВОТ ТАК?
ВАУ, ОНИ МНЕ В САМЫЙ РАЗ!
ХОРОШО. Я ТОЖЕ НАДЕНУ.
ПОЛОЖИМ, МАССА МОЕГО ТЕЛА ОКОЛО 60 КГ.
А ТВОЯ МАССА, НИНОМИЯ-САН, ОКОЛО...
...СКАЖЕМ, 40 КГ. ТЫ НАВЕРНЯКА ЛЕГЧЕ МЕНЯ.
ХА-ХА-ХА...
ХРУП


А ТЕПЕРЬ... ВЫТЯНИ РУКИ, КАК Я, И ОТТОЛКНИ МЕНЯ.
КАК ТЫ ПОЛАГАЕШЬ, НИНОМИЯ-САН, СМОЖЕШЬ ЛИ ТЫ СДВИНУТЬ МЕНЯ, А САМА ОСТАТЬСЯ НА МЕСТЕ?
ХА!
Я, С МАССОЙ 40 КГ, ТОЛКНУ ТЕБЯ, НОНОМУРА-КУН, С МАССОЙ 60 КГ.
ДАЖЕ СМЕШНО!
ИМЕННО ТАК. ПОЧЕМУ ТЫ ТАК УХМЫЛЯЕШЬСЯ?
ВОТ ТАК?
ДА, ВОТ ТАК.
ХЛОП!
НУ, ПОСМОТРИМ!
ВЖ-Ж-Ж
ВЖ-Ж-Ж
ВИДИШЬ, МЫ ОБА ДВИЖЕМСЯ.
И ТЫ, НИНОМИЯ-САН, ОТЪЕХАЛА ДАЛЬШЕ.
?
ММ... А ТЫ ПРАВ...

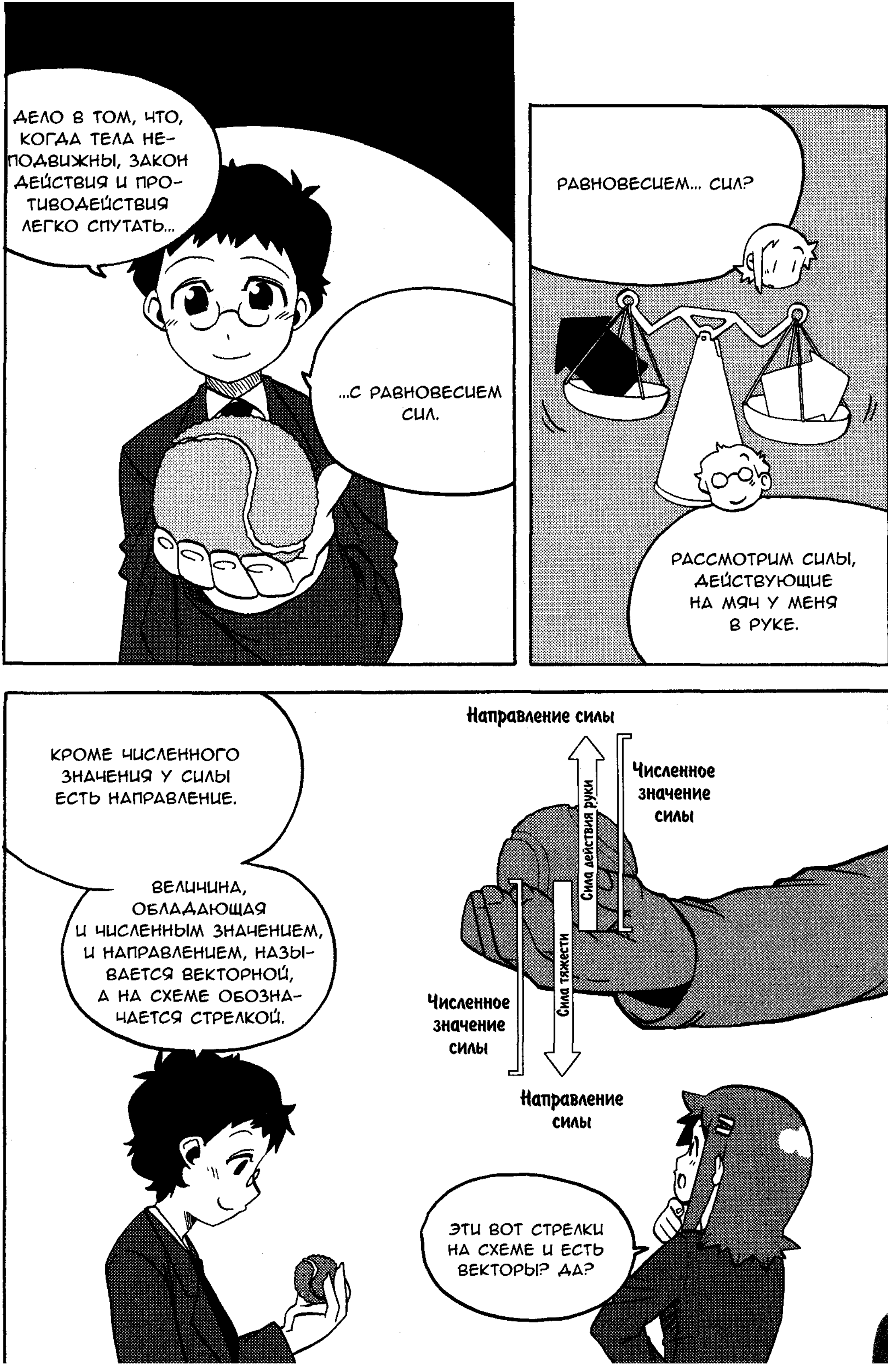

А ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЕМ-КА НАОБОРОТ.
ЕСЛИ ТОЛКАТЬ БУДУ Я, МЫ СНОВА РАЗЪЕДЕМСЯ ТОЧНО ТАК ЖЕ.
ПРАВДА?
КОГДА ТЫ ТОЛКАЕШЬ МЕНЯ, ТО ЕСТЬ ПРИКЛАДЫВАЕШЬ КО МНЕ СИЛУ,
ДАЖЕ ЕСЛИ Я НЕ СОБИРАЮСЬ ТОЛКАТЬ ТЕБЯ В ОТВЕТ,
К ТВОЕМУ ТЕЛУ ТОЖЕ БУДЕТ ПРИЛОЖЕНА СИЛА, НИНОМИЯ-САН.
ВСЯКИЙ РАЗ, КОГДА КТО-ТО ИЗ НАС КАКИМ-ЛИБО ОБРАЗОМ ПРИКЛАДЫВАЕТ СИЛУ К ДРУГОМУ,
ХОП!
НА НЕГО ДЕЙСТВУЕТ ТАКАЯ ЖЕ СИЛА, ТОЛЬКО В ОБРАТНОМ НАПРАВЛЕНИИ.
УХ ТЫ!
ТАК ЧТО В ЛЮБОМ СЛУЧАЕ Я НЕ МОГУ СДВИНУТЬ ТЕБЯ, А САМ ОСТАТЬСЯ НА МЕСТЕ.

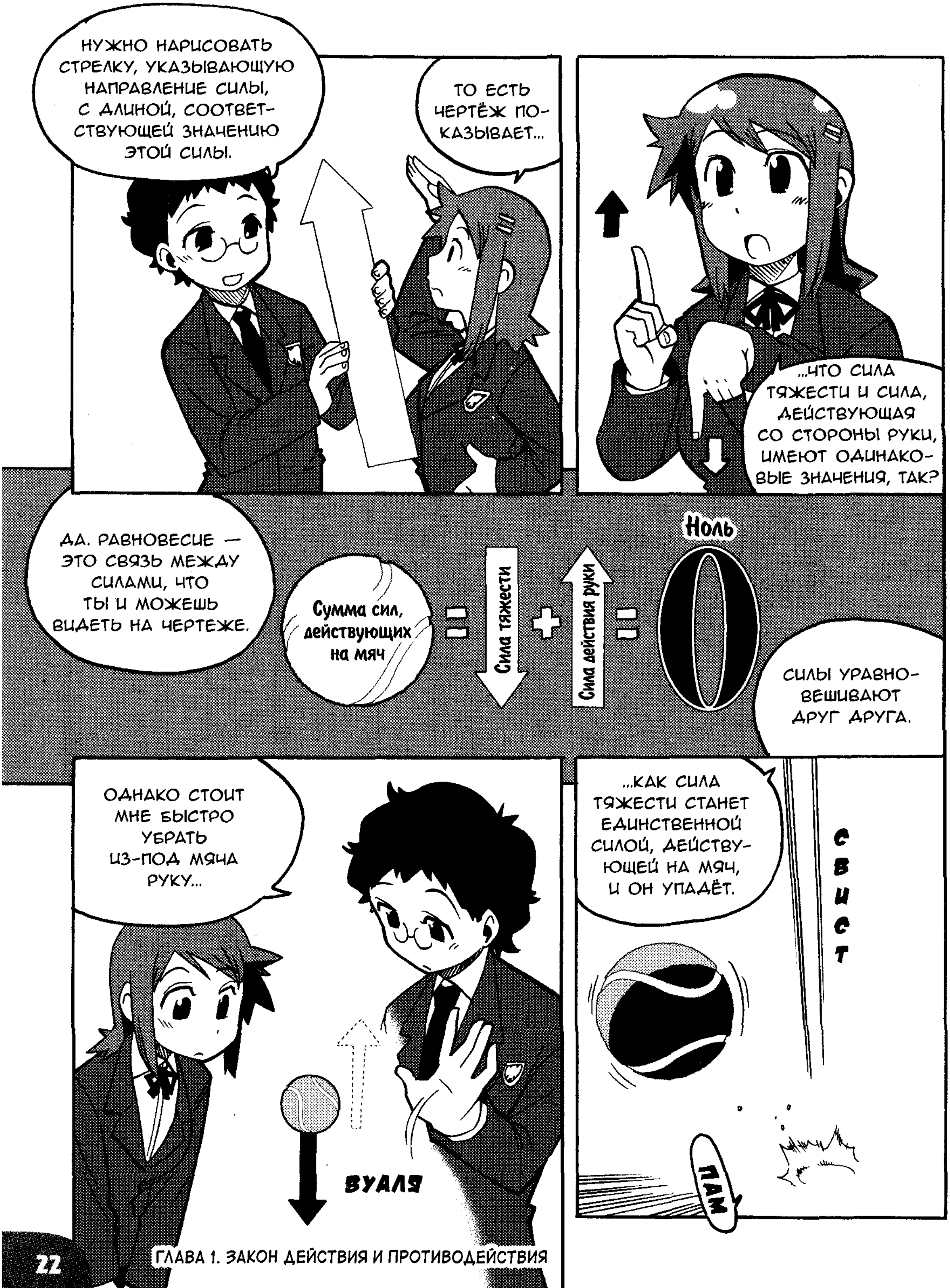
КРОМЕ ТОГО, ЭТИ СИЛЫ ВСЕГДА ОДИНАКОВЫ ДЛЯ ОБЕИХ СТОРОН.
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ ЗАКОНОМ ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ, КОТОРЫЙ ТАКЖЕ ОБЪЯСНЯЕТ, ПОЧЕМУ СИЛЫ ВСЕГДА ВОЗНИКАЮТ МЕЖДУ ДВУМЯ ТЕЛАМИ.
Я ЭТОГО НЕ ЗНАЛА.
ХМ...
ПОДВЕДЁМ ИТОГ.
ЭТОТ ЗАКОН ОПИСЫВАЕТ ЕСТЕСТВЕННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ДВУХ ТЕЛ. КОГДА ТЕЛО **A** ДЕЙСТВУЕТ НА ТЕЛО **B**, В ОТВЕТ ТЕЛО **B** ДЕЙСТВУЕТ НА ТЕЛО **A** С ТАКОЙ ЖЕ ПО ВЕЛИЧИНЕ И ОБРАТНОЙ ПО НАПРАВЛЕНИЮ СИЛОЙ.
Для каждого действия есть такое же по величине и обратное по направлению противодействие.
A
B


ЭТО ЧТО, ЗАКОН ПРИРОДЫ? ОН И В АФРИКЕ ДЕЙСТВУЕТ?
ЗАКОН ПРИРОДЫ — ОН И В АФРИКЕ ЗАКОН.
А ТЕПЕРЬ, ДАВАЙ...
ВЖИХ
БАХ!
СК-Р-Р-Р!
СНИМУ-КА Я ИХ, ПОЖАЛУЙ.
ТЫ В ПОРЯДКЕ?
БЕДНЕНЬКИЙ, ЕМУ БОЛЬНО, НАВЕРНОЕ.

РАВНОВЕСИЕ

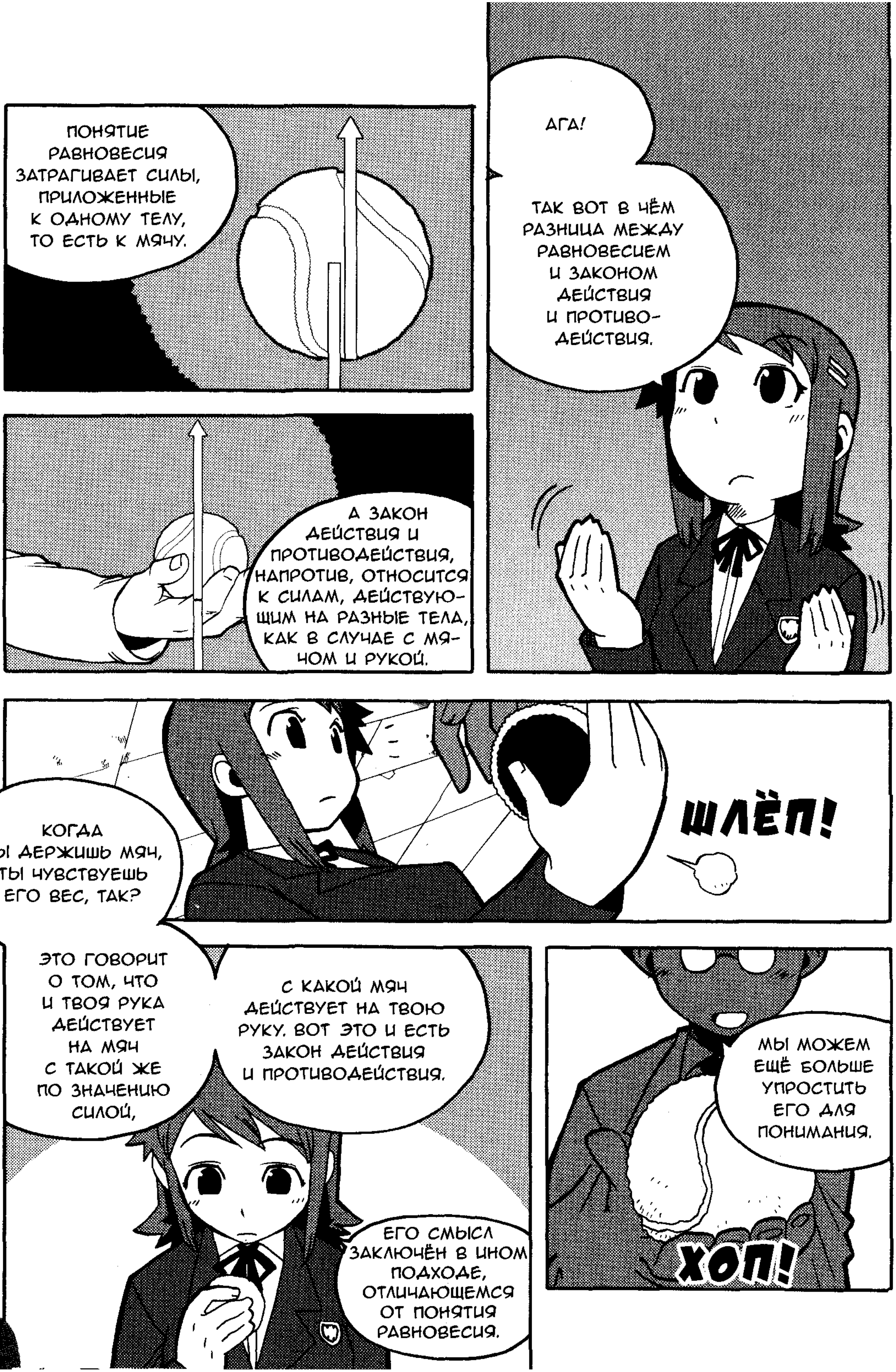

ИТАК, ДАВАЙ ВЕРНЁМСЯ К НАШЕМУ РАЗГОВОРУ О ТЕННИСНОМ МЯЧЕ.


ДЕЛО В ТОМ, ЧТО, КОГДА ТЕЛА НЕПОДВИЖНЫ, ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ 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, НАЗЫВАЕТСЯ ВЕКТОРНОЙ, А НА СХЕМЕ ОБОЗНАЧАЕТСЯ СТРЕЛКОЙ.
Направление силы
Сила действия руки
Численное значение силы
Сила тяжести
Численное значение силы
Направление силы
ЭТИ ВОТ СТРЕЛКИ НА СХЕМЕ И ЕСТЬ ВЕКТОРЫ? ДА?

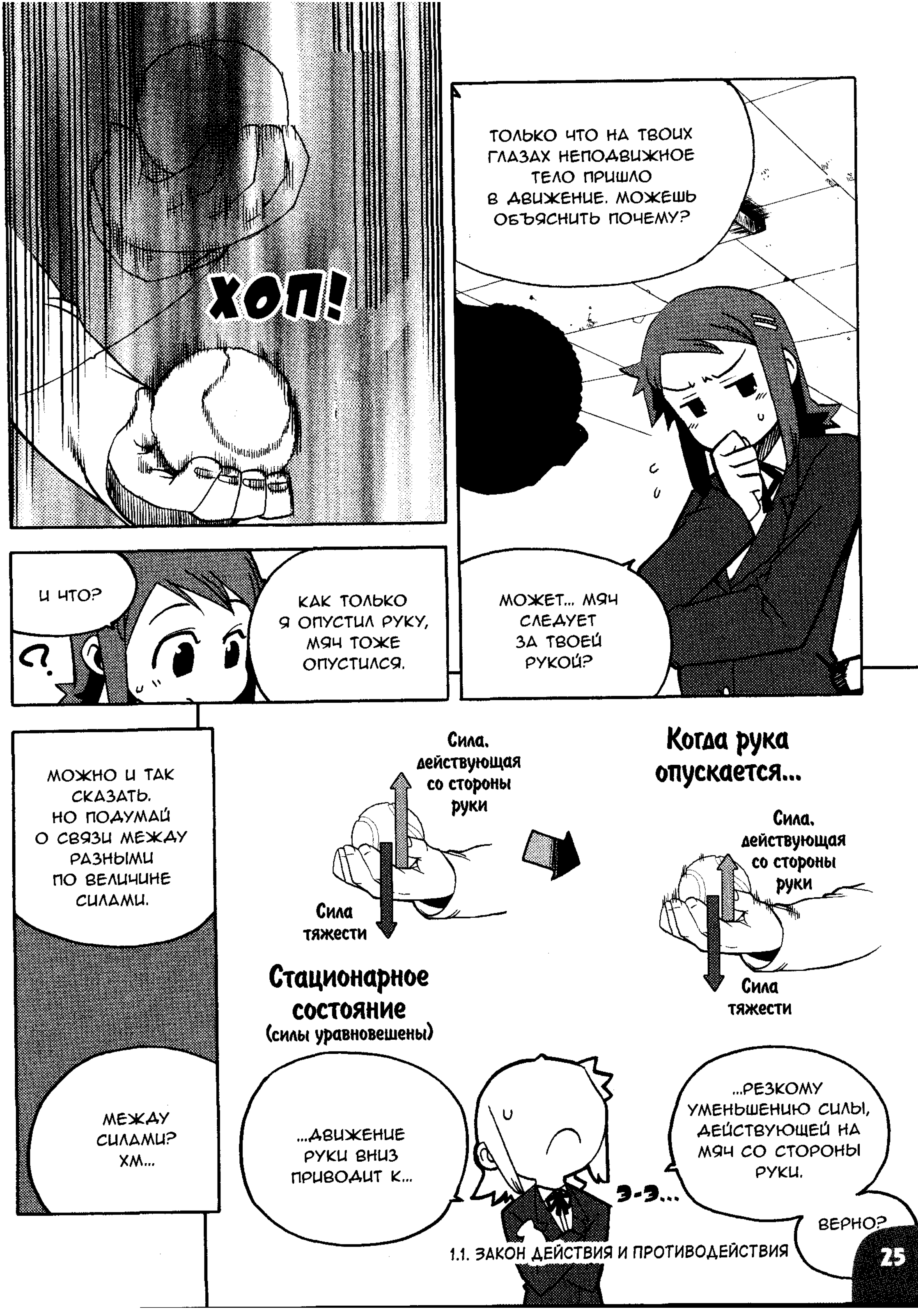


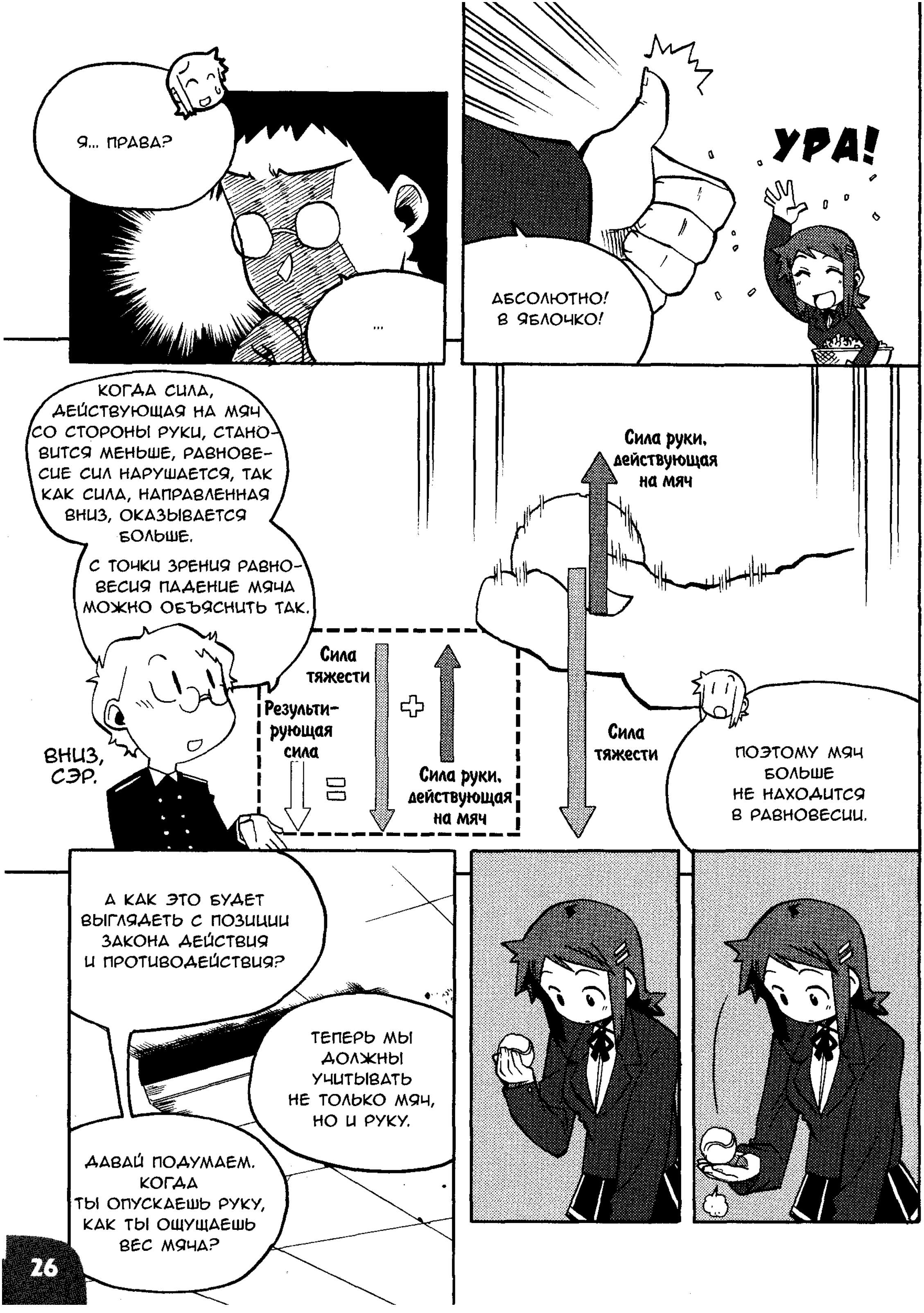
НУЖНО НАРИСОВАТЬ СТРЕЛКУ, УКАЗЫВАЮЩУЮ НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ, С ДЛИНОЙ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ЗНАЧЕНИЮ ЭТОЙ СИЛЫ.
ТО ЕСТЬ ЧЕРТЁЖ ПОКАЗЫВАЕТ...
...ЧТО СИЛА ТЯЖЕСТИ И СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ СО СТОРОНЫ РУКИ, ИМЕЮТ ОДИНАКОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ, ТАК?
ДА. РАВНОВЕСИЕ — ЭТО СВЯЗЬ МЕЖДУ СИЛАМИ, ЧТО ТЫ И МОЖЕШЬ ВИДЕТЬ НА ЧЕРТЕЖЕ.
Сумма сил, действующих на мяч
=
Сила тяжести
+
Сила действия руки
=
Ноль
0
СИЛЫ УРАВНОВЕШИВАЮТ ДРУГ ДРУГА.
ОДНАКО СТОИТ МНЕ БЫСТРО УБРАТЬ ИЗ-ПОД МЯЧА РУКУ...
ВУАЛЯ
...КАК СИЛА ТЯЖЕСТИ СТАНЕТ ЕДИНСТВЕННОЙ СИЛОЙ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА МЯЧ, И ОН УПАДЁТ.
СВИСТ
ПАМ

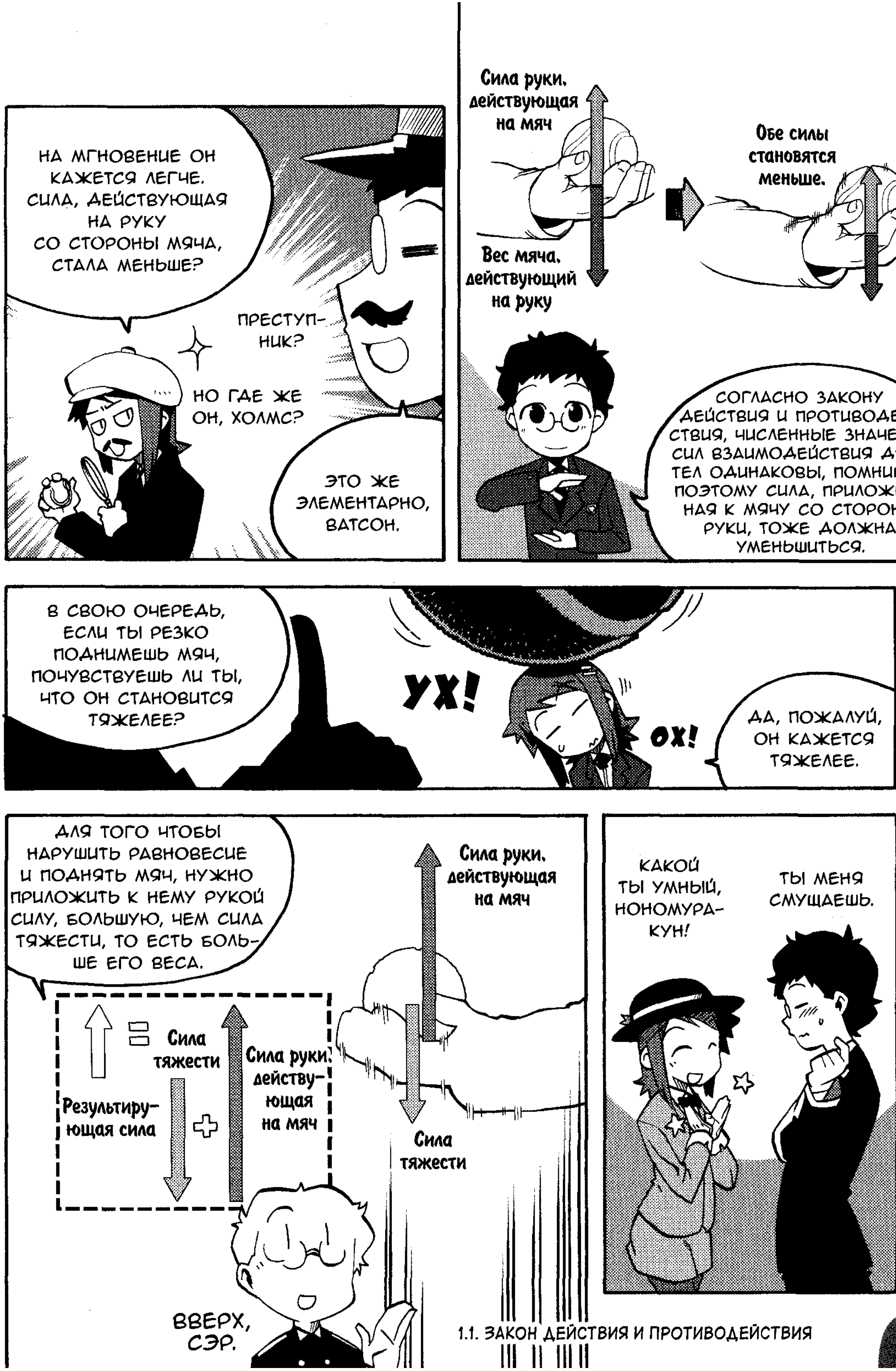
РАВНОВЕСИЕ СИЛ И ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ



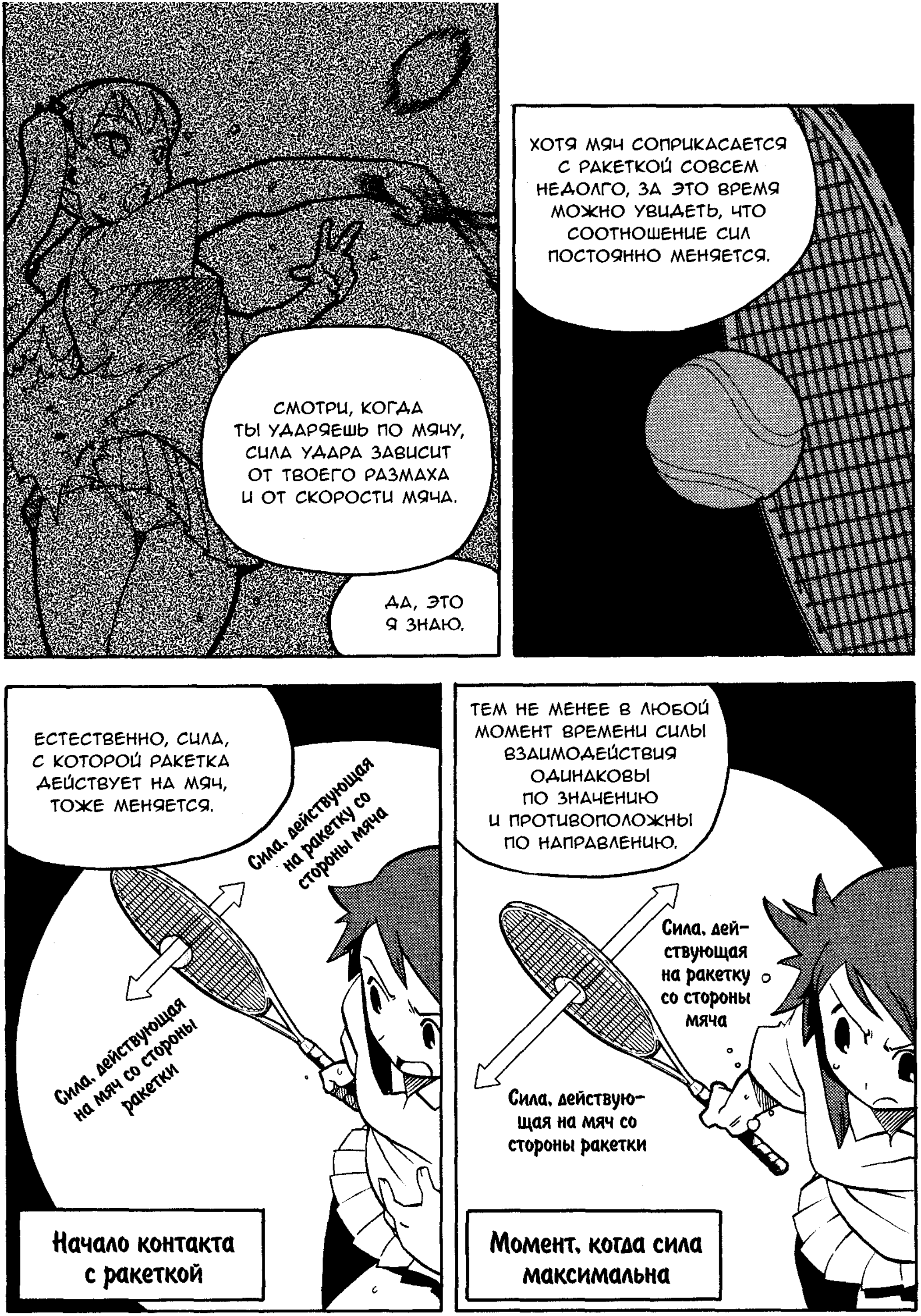
ПОНЯТИЕ РАВНОВЕСИЯ ЗАТРАГИВАЕТ СИЛЫ, ПРИЛОЖЕННЫЕ К ОДНОМУ ТЕЛУ, ТО ЕСТЬ К МЯЧУ.
А ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ, НАПРОТИВ, ОТНОСИТСЯ К СИЛАМ, ДЕЙСТВУЮЩИМ НА РАЗНЫЕ ТЕЛА, КАК В СЛУЧАЕ С МЯЧОМ И РУКОЙ.
АГА!
ТАК ВОТ В ЧЁМ РАЗНИЦА МЕЖДУ РАВНОВЕСИЕМ И ЗАКОНОМ ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.
ШЛЁП!
КОГДА ТЫ ДЕРЖИШЬ МЯЧ, ТЫ ЧУВСТВУЕШЬ ЕГО ВЕС, ТАК?
ЭТО ГОВОРИТ О ТОМ, ЧТО И ТВОЯ РУКА ДЕЙСТВУЕТ НА МЯЧ С ТАКОЙ ЖЕ ПО ЗНАЧЕНИЮ СИЛОЙ,
С КАКОЙ МЯЧ ДЕЙСТВУЕТ НА ТВОЮ РУКУ. ВОТ ЭТО И ЕСТЬ ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.
ЕГО СМЫСЛ ЗАКЛЮЧЁН В ИНОМ ПОДХОДЕ, ОТЛИЧАЮЩЕМСЯ ОТ ПОНЯТИЯ РАВНОВЕСИЯ.
МЫ МОЖЕМ ЕЩЁ БОЛЬШЕ УПРОСТИТЬ ЕГО ДЛЯ ПОНИМАНИЯ.
ХОП!


ХОП!
ТОЛЬКО ЧТО НА ТВОИХ ГЛАЗАХ НЕПОДВИЖНОЕ ТЕЛО ПРИШЛО В ДВИЖЕНИЕ. МОЖЕШЬ ОБЪЯСНИТЬ ПОЧЕМУ?
И ЧТО?
КАК ТОЛЬКО Я ОПУСТИЛ РУКУ, МЯЧ ТОЖЕ ОПУСТИЛСЯ.
МОЖЕТ... МЯЧ СЛЕДУЕТ ЗА ТВОЕЙ РУКОЙ?
МОЖНО И ТАК СКАЗАТЬ. НО ПОДУМАЙ О СВЯЗИ МЕЖДУ РАЗНЫМИ ПО ВЕЛИЧИНЕ СИЛАМИ.
Сила, действующая со стороны руки
Сила тяжести
Стационарное состояние
(силы уравновешены)
Когда рука опускается...
Сила, действующая со стороны руки
Сила тяжести
МЕЖДУ СИЛАМИ? ХМ...
...ДВИЖЕНИЕ РУКИ ВНИЗ ПРИВОДИТ К...
Э-Э...
...РЕЗКОМУ УМЕНЬШЕНИЮ СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА МЯЧ СО СТОРОНЫ РУКИ.
ВЕРНО?


Я... ПРАВА?
...
АБСОЛЮТНО! В ЯБЛОЧКО!
УРА!
КОГДА СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА МЯЧ СО СТОРОНЫ РУКИ, СТАНОВИТСЯ МЕНЬШЕ, РАВНОВЕСИЕ СИЛ НАРУШАЕТСЯ, ТАК КАК СИЛА, НАПРАВЛЕННАЯ ВНИЗ, ОКАЗЫВАЕТСЯ БОЛЬШЕ.
С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РАВНОВЕСИЯ ПАДЕНИЕ МЯЧА МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ ТАК.
ВНИЗ, СЭР.
Результирующая сила
=
Сила тяжести
+
Сила руки, действующая на мяч
Сила руки, действующая на мяч
Сила тяжести
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?


НА МГНОВЕНИЕ ОН КАЖЕТСЯ ЛЕГЧЕ. СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА РУКУ СО СТОРОНЫ МЯЧА, СТАЛА МЕНЬШЕ?
ПРЕСТУПНИК?
НО ГДЕ ЖЕ ОН, ХОЛМС?
ЭТО ЖЕ ЭЛЕМЕНТАРНО, ВАТСОН.
Сила руки, действующая на мяч
Вес мяча, действующий на руку
Обе силы становятся меньше.
СОГЛАСНО ЗАКОНУ ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ, ЧИСЛЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СИЛ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ТЕЛ ОДИНАКОВЫ, ПОМНИШЬ? ПОЭТОМУ СИЛА, ПРИЛОЖЕННАЯ К МЯЧУ СО СТОРОНЫ РУКИ, ТОЖЕ ДОЛЖНА УМЕНЬШИТЬСЯ.
В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, ЕСЛИ ТЫ РЕЗКО ПОДНИМЕШЬ МЯЧ, ПОЧУВСТВУЕШЬ ЛИ ТЫ, ЧТО ОН СТАНОВИТСЯ ТЯЖЕЛЕЕ?
УХ!
ОХ!
ДА, ПОЖАЛУЙ, ОН КАЖЕТСЯ ТЯЖЕЛЕЕ.
ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ НАРУШИТЬ РАВНОВЕСИЕ И ПОДНЯТЬ МЯЧ, НУЖНО ПРИЛОЖИТЬ К НЕМУ РУКОЙ СИЛУ, БОЛЬШУЮ, ЧЕМ СИЛА ТЯЖЕСТИ, ТО ЕСТЬ БОЛЬШЕ ЕГО ВЕСА.
Результирующая сила
=
Сила тяжести
+
Сила руки, действующая на мяч
Сила руки, действующая на мяч
Сила тяжести
ВВЕРХ, СЭР.
КАКОЙ ТЫ УМНЫЙ, НОНОМУРА-КУН!
ТЫ МЕНЯ СМУЩАЕШЬ.


И ТОГДА ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА ТОЖЕ СТАНОВИТСЯ БОЛЬШЕ. ВОТ ПОЧЕМУ МЯЧ КАЖЕТСЯ ТЕБЕ ТЯЖЕЛЕЕ.
Сила, действующая на мяч со стороны руки
Сила, действующая на руку со стороны мяча
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?
?
ЭММ...
НЕ МОЖЕШЬ ОТВЕТИТЬ НА ТАКОЙ ПРОСТОЙ ВОПРОС?!
НЕ ТВОЁ ДЕЛО!
!?
ЧТО С ТОБОЙ, НИНОМИЯ-САН?
ГМ! ПРОСТИ. КАЖЕТСЯ, ВОПРОС ЗВУЧАЛ ПРИМЕРНО ТАК.
9) Предположим, Вы ударяете теннисной ракеткой по мячу. Что больше: сила, с которой мяч отталкивает ракетку, или сила, с которой ракетка отталкивает мяч?


Смотри, когда ты ударяешь по мячу, сила удара зависит от твоего размаха и от скорости мяча.
Да, это я знаю.
Хотя мяч соприкасается с ракеткой совсем недолго, за это время можно увидеть, что соотношение сил постоянно меняется.
Естественно, сила, с которой ракетка действует на мяч, тоже меняется.
Сила, действующая на ракетку со стороны мяча
Сила, действующая на мяч со стороны ракетки
Начало контакта с ракеткой
Тем не менее в любой момент времени силы взаимодействия одинаковы по значению и противоположны по направлению.
Сила, действующая на ракетку со стороны мяча
Сила, действующая на мяч со стороны ракетки
Момент, когда сила максимальна

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА РАССТОЯНИИ, И ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ


Сила тяжести, действующая на мяч
??
ТОГДА ЧТО ДОПОЛНЯЕТ СИЛУ ТЯЖЕСТИ, ДЕЙСТВУЮЩУЮ НА МЯЧ?
ОТКУДА ОНА БЕРЁТСЯ?
ОЧЕНЬ ХОРОШИЙ ВОПРОС.
ОНА БЕРЁТСЯ ОТ ЗЕМЛИ.
ЧТО? ОТ ЗЕМЛИ?
НЕ ТОЛЬКО МЯЧ, НО ТАКЖЕ И ТЫ, И Я, И ДАЖЕ САМОЛЁТ В НЕБЕ ПРИТЯГИВАЮТСЯ ЗЕМЛЁЙ. ЭТО СИЛА ТЯГОТЕНИЯ, КОТОРУЮ МЫ ОБЫЧНО НАЗЫВАЕМ СИЛОЙ ТЯЖЕСТИ.
ХМ... НЕ УВЕРЕНА, ЧТО ПОНИМАЮ ЭТО...
ТЯГОТЕНИЕ ДЕЙСТВУЕТ НА РАССТОЯНИИ И ТЯНЕТ МЯЧ ВНИЗ...
...НА ЗЕМЛЮ ТОЖЕ ДЕЙСТВУЕТ ПРИТЯГИВАЮЩАЯ СИЛА МЯЧА.
Сила, действующая на мяч со стороны Земли
Сила, действующая на Землю со стороны мяча

МЯЧ ПРИТЯГИВАЕТ ЗЕМЛЮ?
КОНЕЧНО. ВЕДЬ ОНИ ОБРАЗУЮТ ПАРУ.
ЛЮБЫЕ ТЕЛА, ОБЛАДАЮЩИЕ МАССОЙ, ПРИТЯГИВАЮТ ДРУГ ДРУГА ПО ЗАКОНУ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ.
ТРУДНО ПОВЕРИТЬ, ЧТО МЯЧ ПРИТЯГИВАЕТ...
НУ, МЯЧ НИКОГДА НЕ СМОЖЕТ СДВИНУТЬ ЗЕМЛЮ, ТАК КАК ЕЁ МАССА ОГРОМНА.
ПОНЯТНО.
ЗЫРЬ
НОНОМУРА-КУН, ЗНАЧИТ, МЕЖДУ ТОБОЙ И МНОЙ ТОЖЕ ДЕЙСТВУЕТ ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ, СБЛИЖАЯ НАС!
ТЫ ЖЕ ОБЕЩАЛА ОТНОСИТЬСЯ К ЗАНЯТИЯМ СЕРЬЁЗНО!
НУ, Я ЖЕ ТОЛЬКО ПОШУТИЛА!
...ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ПРОИЗВЕДЕНИЮ МАСС ПРИТЯГИ-ВАЮЩИХСЯ ТЕЛ.
МАССА ЧЕЛОВЕКА НИЧТОЖНО МАЛА, ТАК ЧТО МЕЖДУ ЛЮДЬМИ ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ НЕ ОЩУЩАЕТСЯ.

1.2. ЗАЧЕМ НУЖНА ФИЗИКА

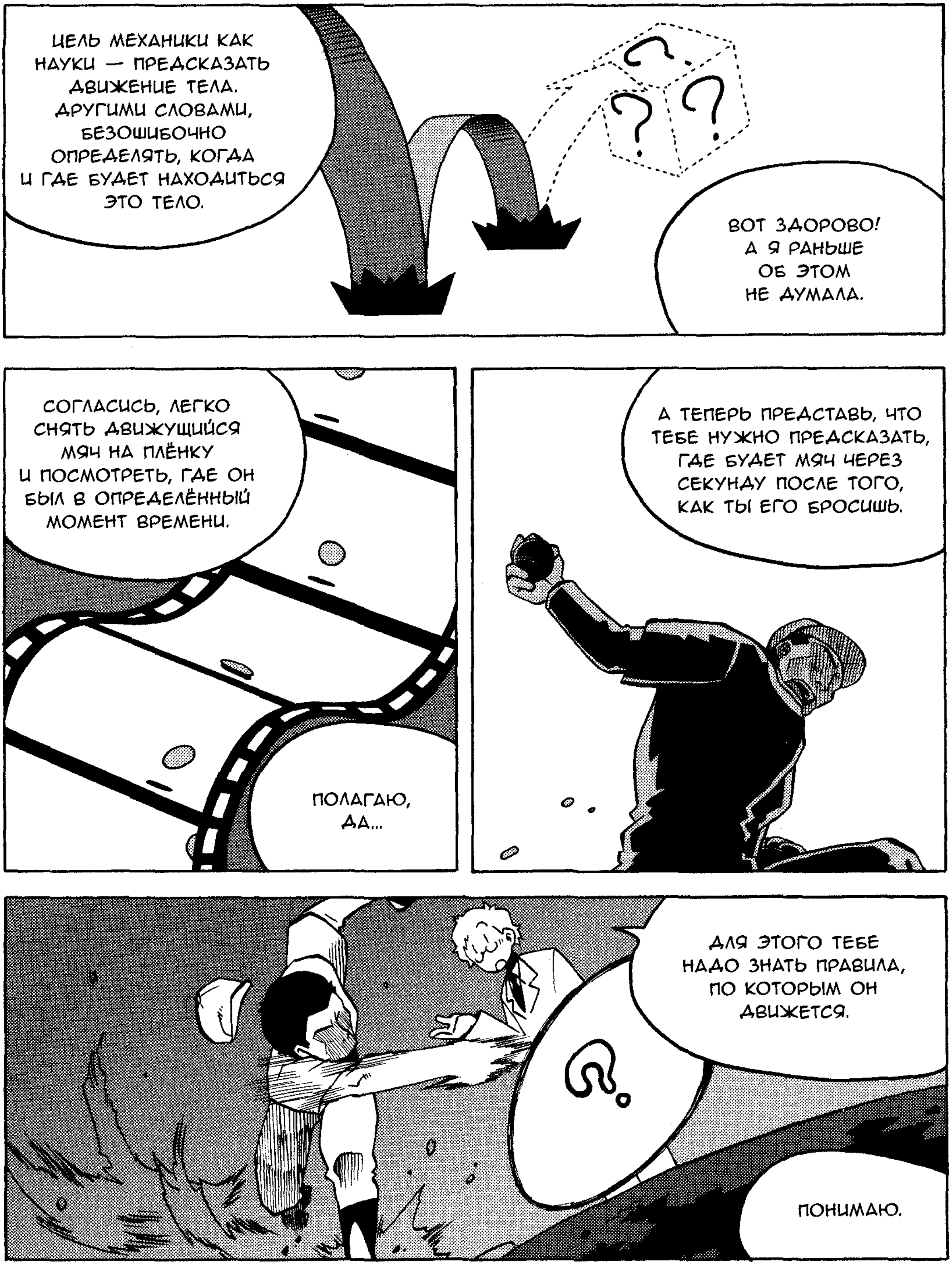
ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА

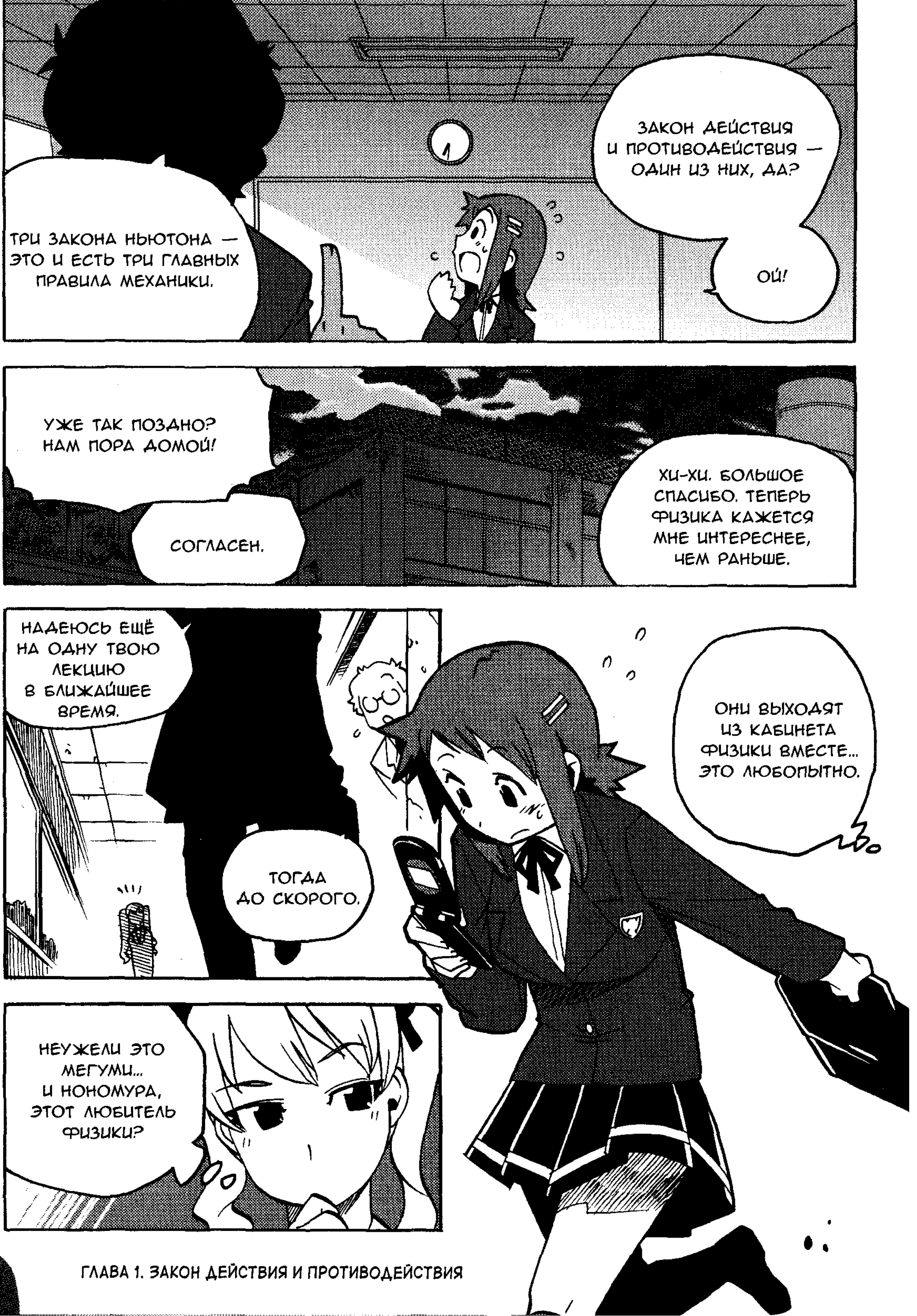

МЯЧ ПРИТЯГИВАЕТ ЗЕМЛЮ?
КОНЕЧНО. ВЕДЬ ОНИ ОБРАЗУЮТ ПАРУ.
ЛЮБЫЕ ТЕЛА, ОБЛАДАЮЩИЕ МАССОЙ, ПРИТЯГИВАЮТ ДРУГ ДРУГА ПО ЗАКОНУ ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ.
ТРУДНО ПОВЕРИТЬ, ЧТО МЯЧ ПРИТЯГИВАЕТ...
НУ, МЯЧ НИКОГДА НЕ СМОЖЕТ СДВИНУТЬ ЗЕМЛЮ, ТАК КАК ЕЁ МАССА ОГРОМНА.
ПОНЯТНО.
ЗЫРЬ
НОНОМУРА-КУН, ЗНАЧИТ, МЕЖДУ ТОБОЙ И МНОЙ ТОЖЕ ДЕЙСТВУЕТ ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ, СБЛИЖАЯ НАС!
...ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ПРОИЗВЕДЕНИЮ МАСС ПРИТЯГИ-ВАЮЩИХСЯ ТЕЛ.
МАССА ЧЕЛОВЕКА НИЧТОЖНО МАЛА, ТАК ЧТО МЕЖДУ ЛЮДЬМИ ВСЕМИРНОЕ ТЯГОТЕНИЕ НЕ ОЩУЩАЕТСЯ.
ТЫ ЖЕ ОБЕЩАЛА ОТНОСИТЬСЯ К ЗАНЯТИЯМ СЕРЬЁЗНО!
НУ, Я ЖЕ ТОЛЬКО ПОШУТИЛА!

1.2. ЗАЧЕМ НУЖНА ФИЗИКА

ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА


ЧТОБЫ ЗАУЧИВАТЬ КУЧУ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ. ТАК Я ДУМАЛА РАНЬШЕ.
МММ...
НО ПОСЛЕ ТВОИХ ОБЪЯСНЕНИЙ, НОНОМУРА-КУН, МОЁ МНЕНИЕ, КАЖЕТСЯ, ИЗМЕНИЛОСЬ.
МОЖЕТ БЫТЬ, ЭТО НАУКА, ОБЪЯСНЯЮЩАЯ МЕХАНИКУ ДВИЖЕНИЯ?
КРУТЬ
КРУТЬ
ХОРОШО СКАЗАНО!
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.
А ОСНОВА ФИЗИКИ — КЛАССИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА, КОТОРУЮ МЫ СЕЙЧАС И ИЗУЧАЕМ.
УХ ТЫ! ЗВУЧИТ ДОВОЛЬНО УБЕДИТЕЛЬНО.


ЦЕЛЬ МЕХАНИКИ КАК НАУКИ — ПРЕДСКАЗАТЬ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, БЕЗОШИБОЧНО ОПРЕДЕЛЯТЬ, КОГДА И ГДЕ БУДЕТ НАХОДИТЬСЯ ЭТО ТЕЛО.
ВОТ ЗДОРОВО! А Я РАНЬШЕ ОБ ЭТОМ НЕ ДУМАЛА.
СОГЛАСИСЬ, ЛЕГКО СНЯТЬ ДВИЖУЩИЙСЯ МЯЧ НА ПЛЁНКУ 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.
ДЛЯ ЭТОГО ТЕБЕ НАДО ЗНАТЬ ПРАВИЛА, ПО КОТОРЫМ ОН ДВИЖЕТСЯ.
ПОНИМАЮ.


ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА — ЭТО И ЕСТЬ ТРИ ГЛАВНЫХ ПРАВИЛА МЕХАНИКИ.
ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ — ОДИН ИЗ НИХ, ДА?
ОЙ!
УЖЕ ТАК ПОЗДНО? НАМ ПОРА ДОМОЙ!
СОГЛАСЕН.
ХИ-ХИ. БОЛЬШОЕ СПАСИБО. ТЕПЕРЬ ФИЗИКА КАЖЕТСЯ МНЕ ИНТЕРЕСНЕЕ, ЧЕМ РАНЬШЕ.
НАДЕЮСЬ ЕЩЁ НА ОДНУ ТВОЮ ЛЕКЦИЮ В БЛИЖАЙШЕЕ ВРЕМЯ.
ТОГДА ДО СКОРОГО.
ОНИ ВЫХОДЯТ ИЗ КАБИНЕТА ФИЗИКИ ВМЕСТЕ... ЭТО ЛЮБОПЫТНО.
НЕУЖЕЛИ ЭТО МЕГУМИ... И НОНОМУРА, ЭТОТ ЛЮБИТЕЛЬ ФИЗИКИ?

ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!

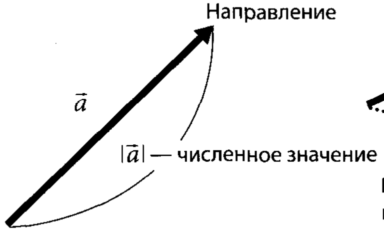
СКАЛЯРНЫЕ И ВЕКТОРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

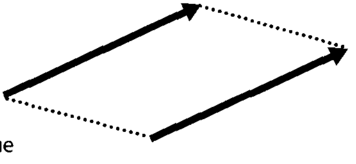
Физика в целом, и механика в частности, изучают свойства различных объектов и механизмы их взаимодействия. Такие свойства, как масса, сила, скорость и другие, называются физическими величинами, которые могут быть охарактеризованы либо только численным значением, либо численным значением и направлением. 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.

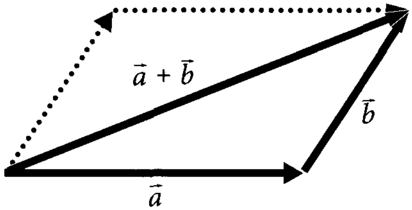


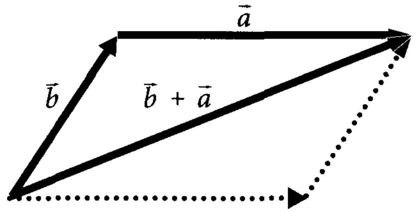


Векторы, которые можно совместить параллельным переносом, эквивалентны

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

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

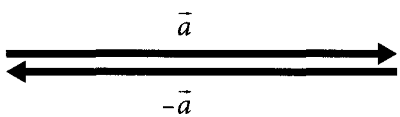
ЗАКОН КОММУТАТИВНОСТИ (переместительный закон)

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:

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



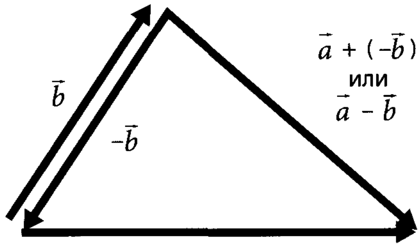
На языке геометрии $-\vec{a}$ — это всего лишь вектор, длина которого совпадает с длиной a, а направление строго противоположно. Ноль в правой части равенства также представляет собой вектор, который называют нулевым вектором.

ВЫЧИТАНИЕ ВЕКТОРОВ

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

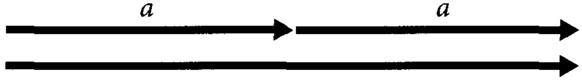
$$\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

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 $2\vec{a}$.



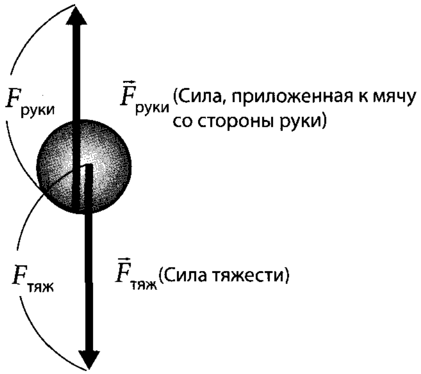
В общем случае умножение вектора $\vec{a}$ на некое число k ($k\vec{a}$) даёт вектор, длина которого в k раз больше длины $\vec{a}$, а направление сохраняется.

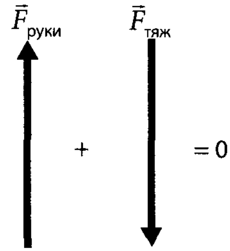
ВЕКТОРЫ СИЛ И РАВНОВЕСИЕ

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

$$\text{результирующая сила, действующая на мяч} = \text{сила тяжести} + \text{сила, действующая со стороны руки} = 0.$$

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 результирующая сила, действующая на тело, должна равняться именно сумме всех сил.





Рассмотрим баланс сил, действующих на мяч. Обозначим силу, действующую на мяч со стороны руки, $\vec{F}_{руки}$, а силу тяжести — $\vec{F}_{тяж}$. Результирующая сила ($\vec{F}_{рез}$), действующая на мяч, равна:

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

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

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

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

Сила, приложенная к мячу со стороны руки + 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. $|\vec{F}_{руки}|$ и $|\vec{F}_{тяж}|$. Справедлива также другая форма записи: $|\vec{F}_{руки}| = F_{руки}$ и $|\vec{F}_{тяж}| = F_{тяж}$. Мы знаем, что равенство значений этих двух сил можно записать так:

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

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 телу, 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 остаётся 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.

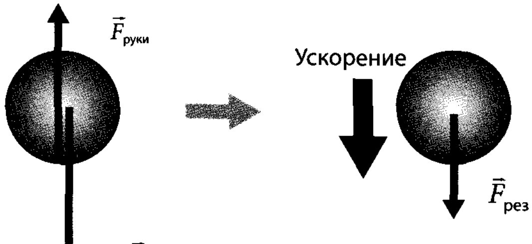
Как мы узнали из этой главы, закон действия и противодействия — это третий закон движения. Этот закон говорит нам о том, что сила, с которой рука действует на мяч, и сила, с которой мяч действует на руку, равны по величине и противоположны по направлению. Закон действия и противодействия работает всегда, 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 ($F_{руки}$), уменьшится, а сила тяжести ($F_{тяж}$) останется прежней.

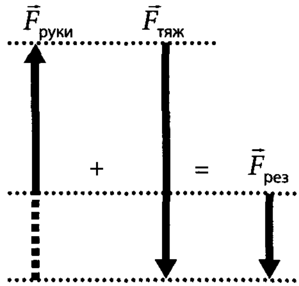
Следовательно, равновесие сил нарушится, и сумма $F_{тяж}$ и $F_{руки}$ примет ненулевое значение, пока движется мяч. В скалярной форме получим

$$F_{рез} = F_{тяж} - F_{руки} > 0.$$

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.



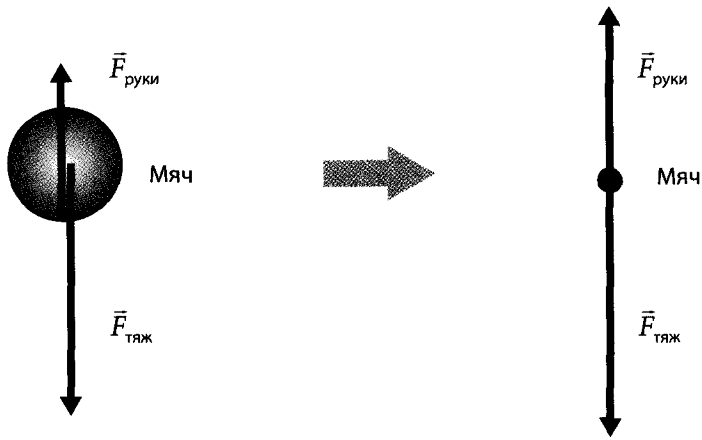
Но нужно понимать одно обстоятельство. Если мяч движется вверх или вниз с постоянной скоростью, то имей в виду, что равнодействующая (результирующая) сила, приложенная к нему, остаётся нулевой, так как силы уравновешивают друг друга, и он не ускоряется. Об этом говорит первый закон движения. Ненулевая 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 объёма, или как точечную массу. Мы будем делать это со всеми объёмными телами, так как в противном случае вычисления могут сильно усложниться. Соответствующую упрощённую 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 $\vec{F}_{A->B}$, а тело В действует на тело А с силой $\vec{F}_{B->A}$, закон действия и противодействия записывается так:

$$\vec{F}_{A->B} = -\vec{F}_{B->A}. \qquad (1)$$

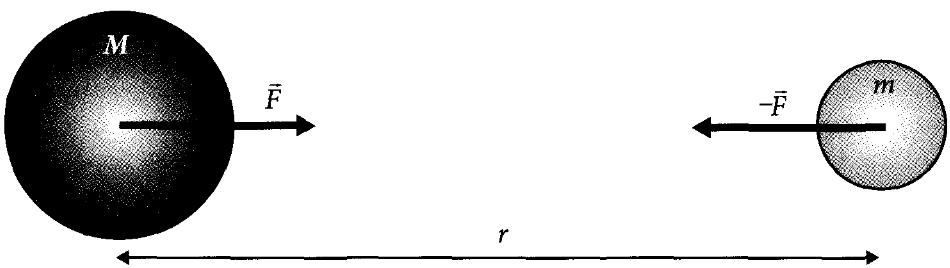
Таким образом, можно записать этот закон одним равенством, как показано в формуле (1). А переходя к абсолютным величинам, получаем

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

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 Ньютоном. 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

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

G — универсальная константа, называемая *гравитационной постоянной.*

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

Н, или нью́тон, — 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) можно 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.

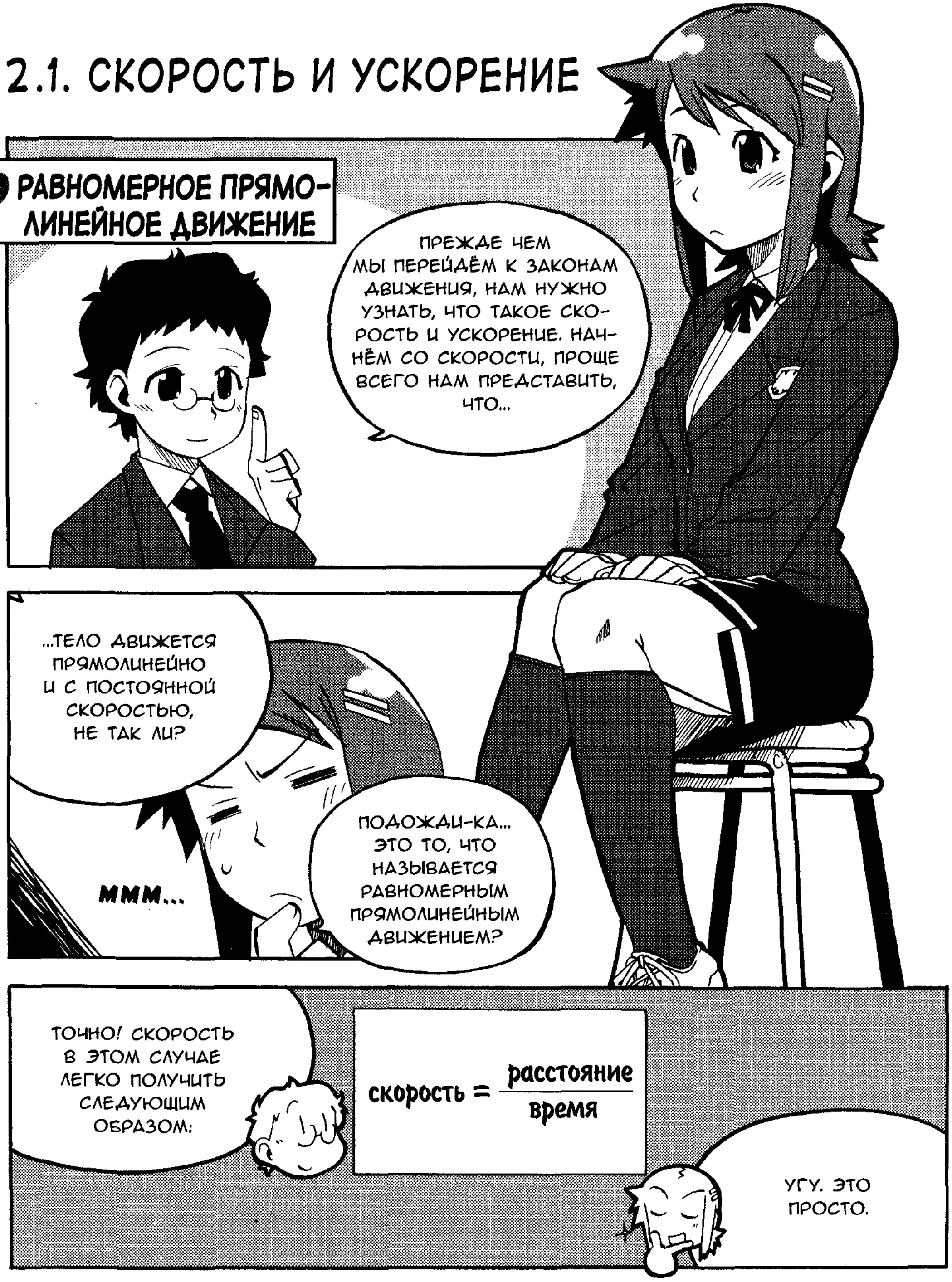
Силы всемирного тяготения очень малы по сравнению с электромагнитными силами. Однако если электромагнитные силы могут быть как притягивающими, так и отталкивающими, в зависимости от сочетания положительных и отрицательных зарядов, то всемирное тяготение — это всегда сила притяжения, т. е. тела стремятся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

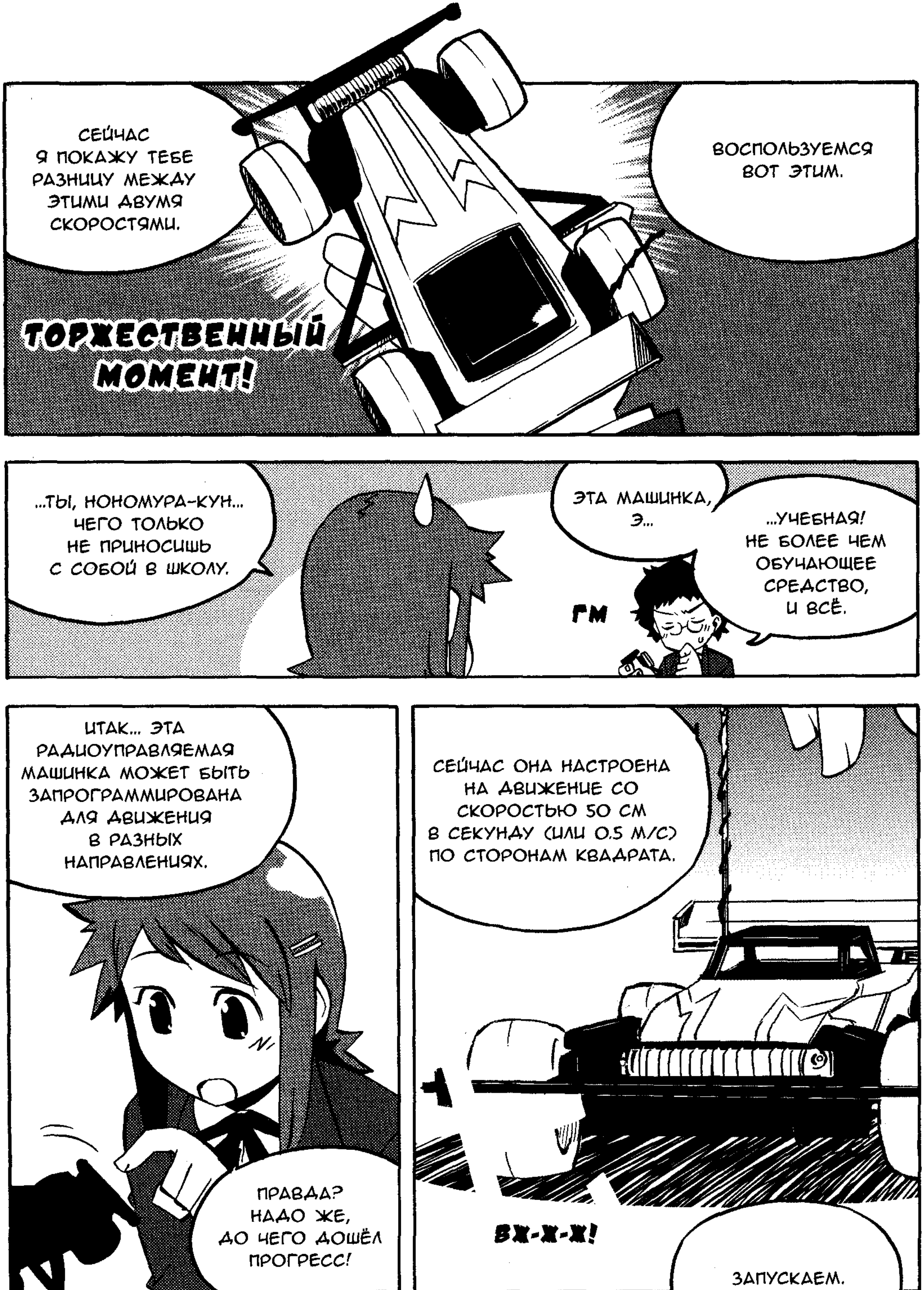
2 СИЛА И ДВИЖЕНИЕ

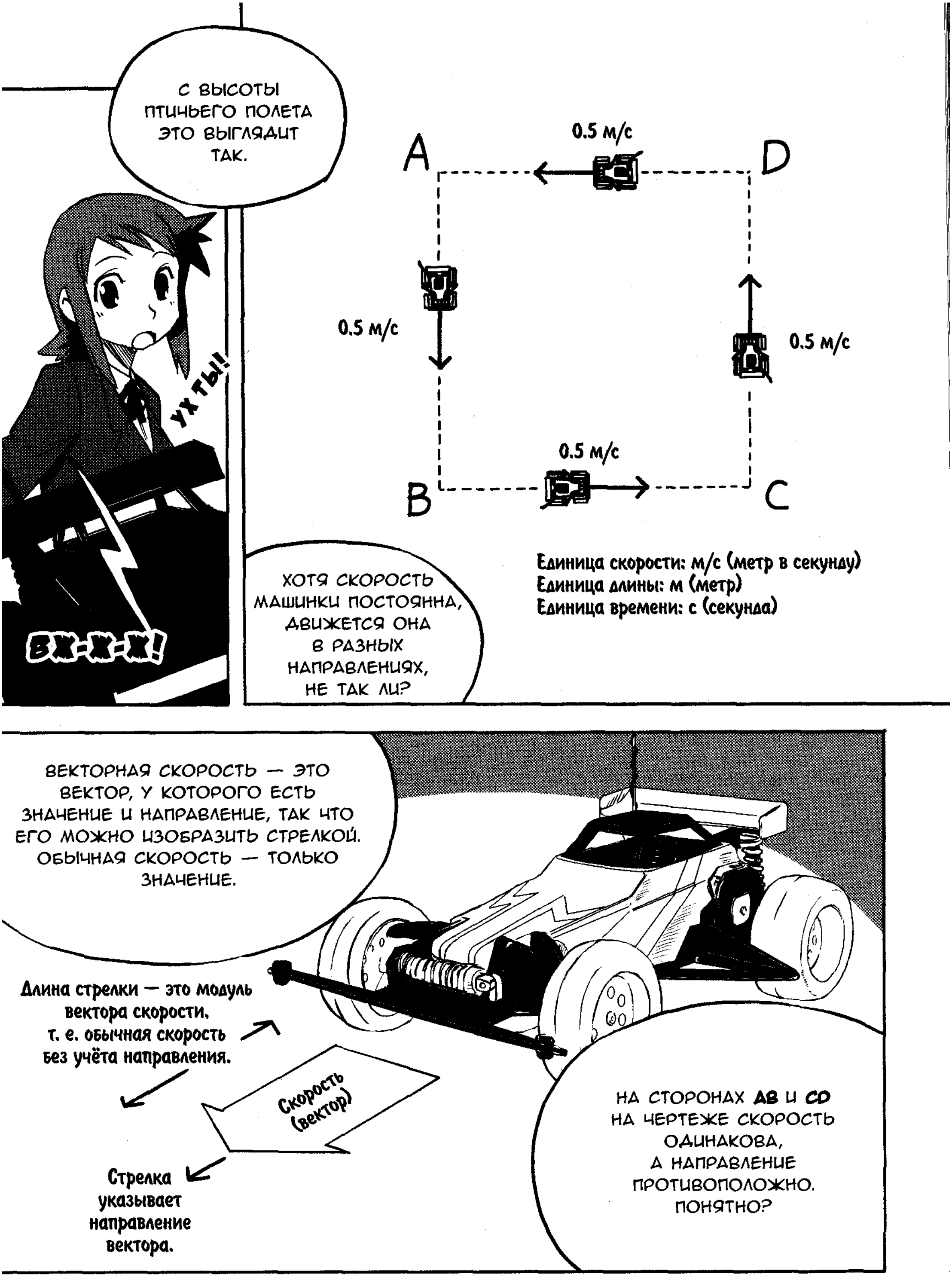
2.1. СКОРОСТЬ И УСКОРЕНИЕ

РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ




ОДНАКО, ДАЖЕ ЕСЛИ МОЯ СКОРОСТЬ ПОСТОЯННА, Я МОГУ ОКАЗАТЬСЯ В РАЗНЫХ МЕСТАХ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ.
ПОЭТОМУ ДЛЯ УЧЁТА НАПРАВЛЕНИЯ МЫ ЗАМЕНИМ НАШУ ПРИВЫЧНУЮ **СКОРОСТЬ** ДРУГОЙ, **ВЕКТОРНОЙ**, А **РАССТОЯНИЕ** — **ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ**.
$$\text{скорость} = \frac{\text{перемещение}}{\text{время}}$$
ТАК... ПОНЯТНО.
ПОДОЖДИ!
У МЕНЯ ВОПРОС!
ЧЕМ ОБЫЧНАЯ СКОРОСТЬ ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ВЕКТОРНОЙ?
ДАВАЙ РАЗБЕРЁМСЯ.


СЕЙЧАС Я ПОКАЖУ ТЕБЕ РАЗНИЦУ МЕЖДУ ЭТИМИ ДВУМЯ СКОРОСТЯМИ.
ВОСПОЛЬЗУЕМСЯ ВОТ ЭТИМ.
ТОРЖЕСТВЕННЫЙ МОМЕНТ!
...ТЫ, НОНОМУРА-КУН... ЧЕГО ТОЛЬКО НЕ ПРИНОСИШЬ С СОБОЙ В ШКОЛУ.
ЭТА МАШИНКА, Э...
...УЧЕБНАЯ! НЕ БОЛЕЕ ЧЕМ ОБУЧАЮЩЕЕ СРЕДСТВО, И ВСЁ.
ГМ
ИТАК... ЭТА РАДИОУПРАВЛЯЕМАЯ МАШИНКА МОЖЕТ БЫТЬ ЗАПРОГРАММИРОВАНА ДЛЯ ДВИЖЕНИЯ В РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ.
ПРАВДА? НАДО ЖЕ, ДО ЧЕГО ДОШЁЛ ПРОГРЕСС!
СЕЙЧАС ОНА НАСТРОЕНА НА ДВИЖЕНИЕ СО СКОРОСТЬЮ 50 СМ В СЕКУНДУ (ИЛИ 0.5 М/С) ПО СТОРОНАМ КВАДРАТА.
ВЖ-Ж-Ж!
ЗАПУСКАЕМ.


С ВЫСОТЫ ПТИЧЬЕГО ПОЛЕТА ЭТО ВЫГЛЯДИТ ТАК.
УХ ТЫ!
ВЖ-Ж-Ж!
A
B
C
D
0.5 м/с
0.5 м/с
0.5 м/с
0.5 м/с
Единица скорости: м/с (метр в секунду)
Единица длины: м (метр)
Единица времени: с (секунда)
ХОТЯ СКОРОСТЬ МАШИНКИ ПОСТОЯННА, ДВИЖЕТСЯ ОНА В РАЗНЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ, НЕ ТАК ЛИ?
ВЕКТОРНАЯ СКОРОСТЬ — ЭТО ВЕКТОР, У КОТОРОГО ЕСТЬ ЗНАЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЕ, ТАК ЧТО ЕГО МОЖНО ИЗОБРАЗИТЬ СТРЕЛКОЙ. ОБЫЧНАЯ СКОРОСТЬ — ТОЛЬКО ЗНАЧЕНИЕ.
Длина стрелки — это модуль вектора скорости, т. е. обычная скорость без учёта направления.
Скорость (вектор)
Стрелка указывает направление вектора.
НА СТОРОНАХ AB И CD НА ЧЕРТЕЖЕ СКОРОСТЬ ОДИНАКОВА, А НАПРАВЛЕНИЕ ПРОТИВОПОЛОЖНО. ПОНЯТНО?

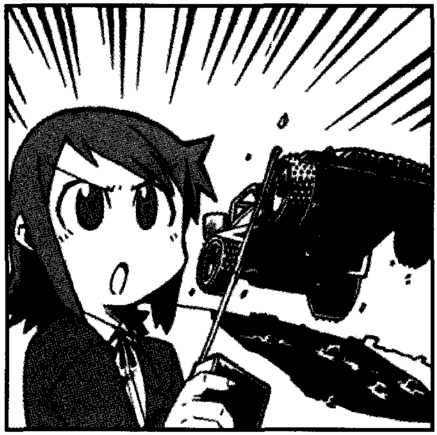
УСКОРЕНИЕ


КЛАЦ-КЛАЦ
КЛАЦ-КЛАЦ
КЛАЦ-КЛАЦ
ТРИНЬ-ТРИНЬ
ТРИНЬ-ТРИНЬ
ТЕПЕРЬ ПОМЕНЯЕМ НАСТРОЙКИ ТАК, ЧТОБЫ СКОРОСТЬ РАВНОМЕРНО ВОЗРАСТАЛА ОТ 0 ДО 0.5 М/С.
В ЭТОМ СЛУЧАЕ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ В ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ НАЗЫВАЕТСЯ УСКОРЕНИЕМ, КОТОРОЕ МОЖНО РАССЧИТАТЬ С ПОМОЩЬЮ СЛЕДУЮЩЕЙ ФОРМУЛЫ:
ускорение = изменение скорости / время
ЕДИНИЦА ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ — МЕТР В СЕКУНДУ В КВАДРАТЕ, ЗАПИСЫВАЕТСЯ КАК М/С². УСКОРЕНИЕ ПОКАЗЫВАЕТ, КАК ИЗМЕНИЛАСЬ СКОРОСТЬ (М/С) ЗА СЕКУНДУ.
КЛАЦ-КЛАЦ-КЛАЦ
ТО ЕСТЬ МЫ ДЕЛИМ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ НА ВРЕМЯ.
УГУ.
РАЗУМЕЕТСЯ. ЕСЛИ СКОРОСТЬ ПОСТОЯННА, ЕЁ ИЗМЕНЕНИЕ РАВНО НУЛЮ, И УСКОРЕНИЕ, СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ТАКЖЕ РАВНО НУЛЮ.
БИ-БИ

КОГДА СКОРОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ, УСКОРЕНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНО. КОГДА ОНА УМЕНЬШАЕТСЯ, ТО ЕСТЬ ДВИЖЕНИЕ ЗАМЕДЛЯЕТСЯ, УСКОРЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНО.
НЕ СПЕША
УСКОРЕНИЕ БЫВАЕТ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ?
ДА! ЭТО КОГДА МАШИНКА ТОРМОЗИТ. ХОЧЕТСЯ НАЗВАТЬ ЭТО "ЗАМЕДЛЕНИЕМ".
ПРОСТО ДУМАЙ, ЧТО ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ — ЭТО И ЕСТЬ ЗАМЕДЛЕНИЕ.
НЕ СПЕША
НЕ СПЕША
ДВИЖЕНИЕ С РАВНОМЕРНЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ СКОРОСТИ НАЗЫВАЮТ **РАВНОУСКОРЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ**.
скорость
И ТВОЮ МАШИНКУ МОЖНО ЗАПРОГРАММИРОВАТЬ НА РАВНОУСКОРЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ?
ТИШЕ ЕДЕШЬ, ДАЛЬШЕ БУДЕШЬ!
ЭЙ! КАК ТЫ ОКАЗАЛСЯ ТАК ДАЛЕКО ВПЕРЕДИ?


О ДА, МОЯ МАШИНКА МОЖЕТ ДВИГАТЬСЯ РАВНОУСКОРЕННО. А ТЕПЕРЬ ПОСЧИТАЕМ ЕЁ УСКОРЕНИЕ, ИСПОЛЬЗУЯ ФОРМУЛУ.
ОЙ! НАЧАЛОСЬ!
ПОСМОТРИМ... РАДИОУПРАВЛЯЕМАЯ МАШИНКА РАЗГОНЯЕТСЯ ОТ 0 ДО 0.5 М/С ЗА 4 СЕКУНДЫ.
Формула:
$$\text{ускорение} = \frac{\text{изменение скорости}}{\text{время}}$$
МММ...
МЫ МОЖЕМ ПОДСТАВИТЬ ЭТИ ЗНАЧЕНИЯ В ФОРМУЛУ.
ТОГДА ПОЛУЧИМ; ИЗМЕНЕНИЕ НА 0.5 М/С ЗА 4 С — ЭТО 0.125 М/С^2! ВЕРНО?
АБСОЛЮТНО!
ДЕРЖИСЬ УВЕРЕННЕЕ, У ТЕБЯ ВСЁ ПОЛУЧАЕТСЯ.
ПОЛУЧЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ ГОВОРИТ О ТОМ, ЧТО СКОРОСТЬ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ НА 0.125 М/С ЗА СЕКУНДУ.
ИСПОЛЬЗУЯ ЭТУ ФОРМУЛУ, МЫ МОЖЕМ НАЙТИ ПРОЙДЕННОЕ РАССТОЯНИЕ ДАЖЕ ДЛЯ ТЕЛ, ДВИЖУЩИХСЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ.
ПОНЯТНО.

Лаб НАЙДЁМ ПРОЙДЕННОЕ РАССТОЯНИЕ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ



Теперь поменяем настройки так, чтобы скорость равномерно возрастала 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, Ономура-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 × время). Пусть x м (метров) — это расстояние, пройденное за t с (секунд), а постоянная скорость — v м/с, тогда выражение

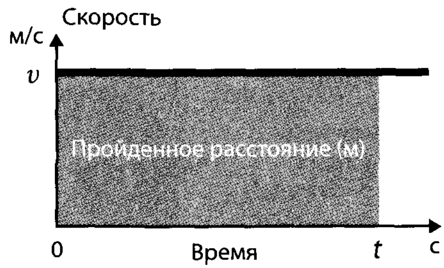
$$\text{расстояние} = \text{скорость} \times \text{время}$$

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 м/с). Поэтому их произведение даёт «с × м/с = 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

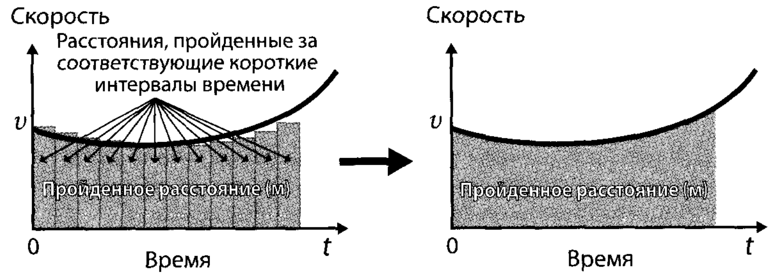
расстояние = скорость × время.

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

Что ты имеешь в виду?

Давай обсудим!

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...

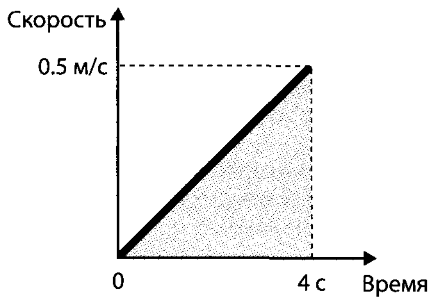
Если мы разделим всё время движения машинки на бесконечно узкие прямоугольники, то сможем точно рассчитать, какое расстояние она преодолела. Ведь предельное значение, которое мы получаем при делении графика «расстояние = скорость × время» на короткие временные интервалы, равно площади под этим графиком.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

$$\text{пройденное расстояние} = \text{площадь под графиком } v(t).$$

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

$$\frac{1}{2} \times \text{основание (время)} \times \text{высота (максимальная скорость)} =$$
$$= \frac{1}{2} \times 4\ \text{с} \times 0\ 5\ \text{м/с} = 1\ \text{м}.$$

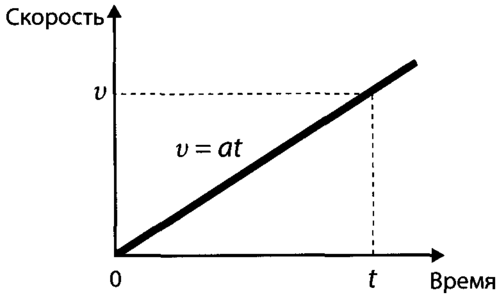
Это соответствует пройденному расстоянию.

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

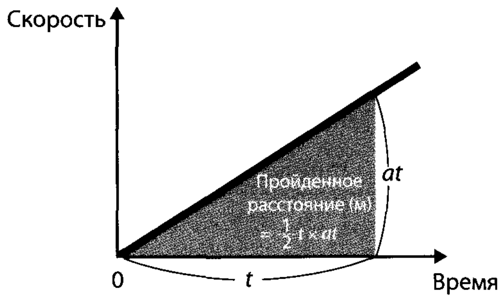
$$v = at.$$

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?

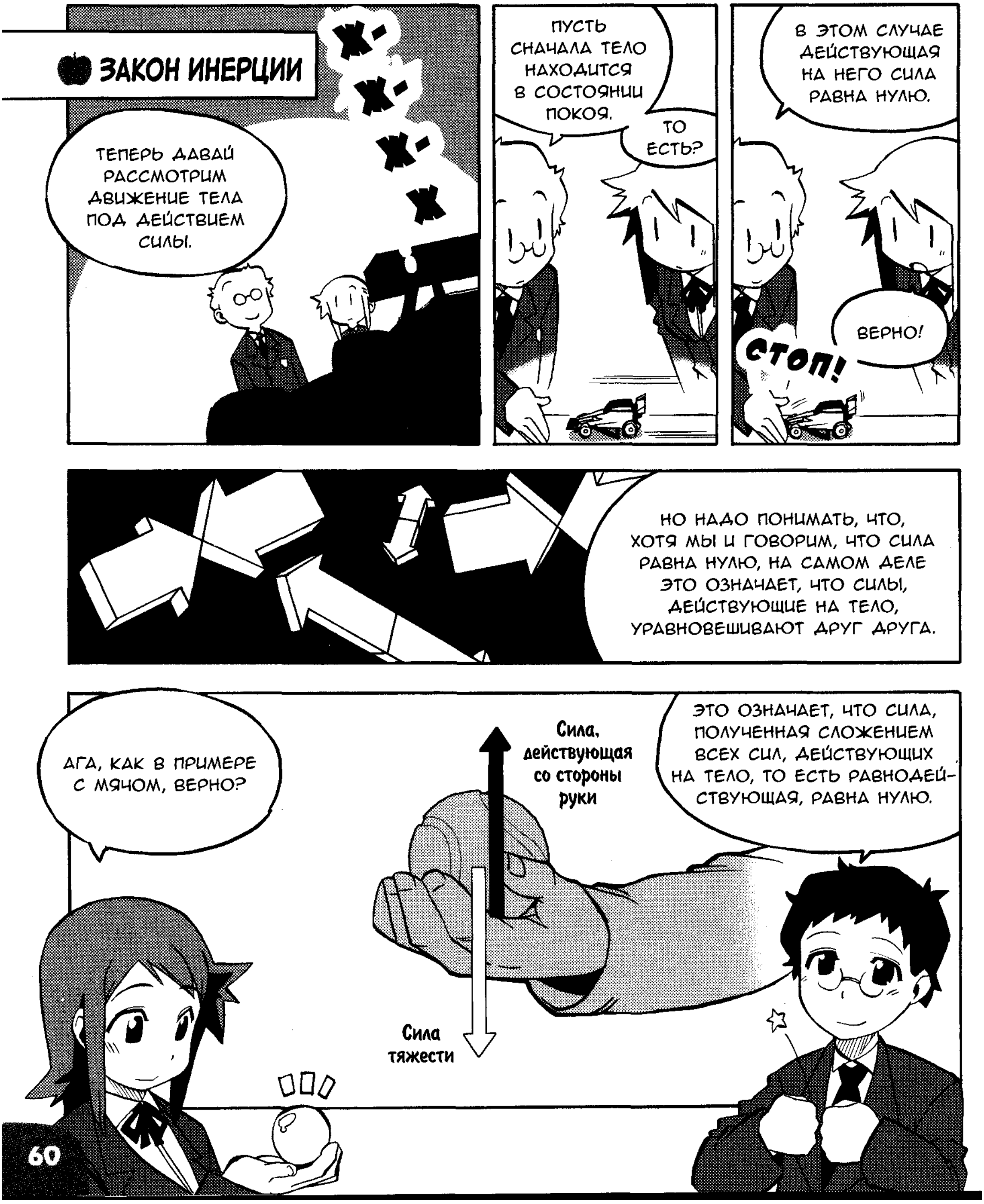
Эм-м-м... да, я поняла, в чём тут дело! Если применить эту формулу к примеру с радиоуправляемой машинкой, получим

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

Как и должно быть!

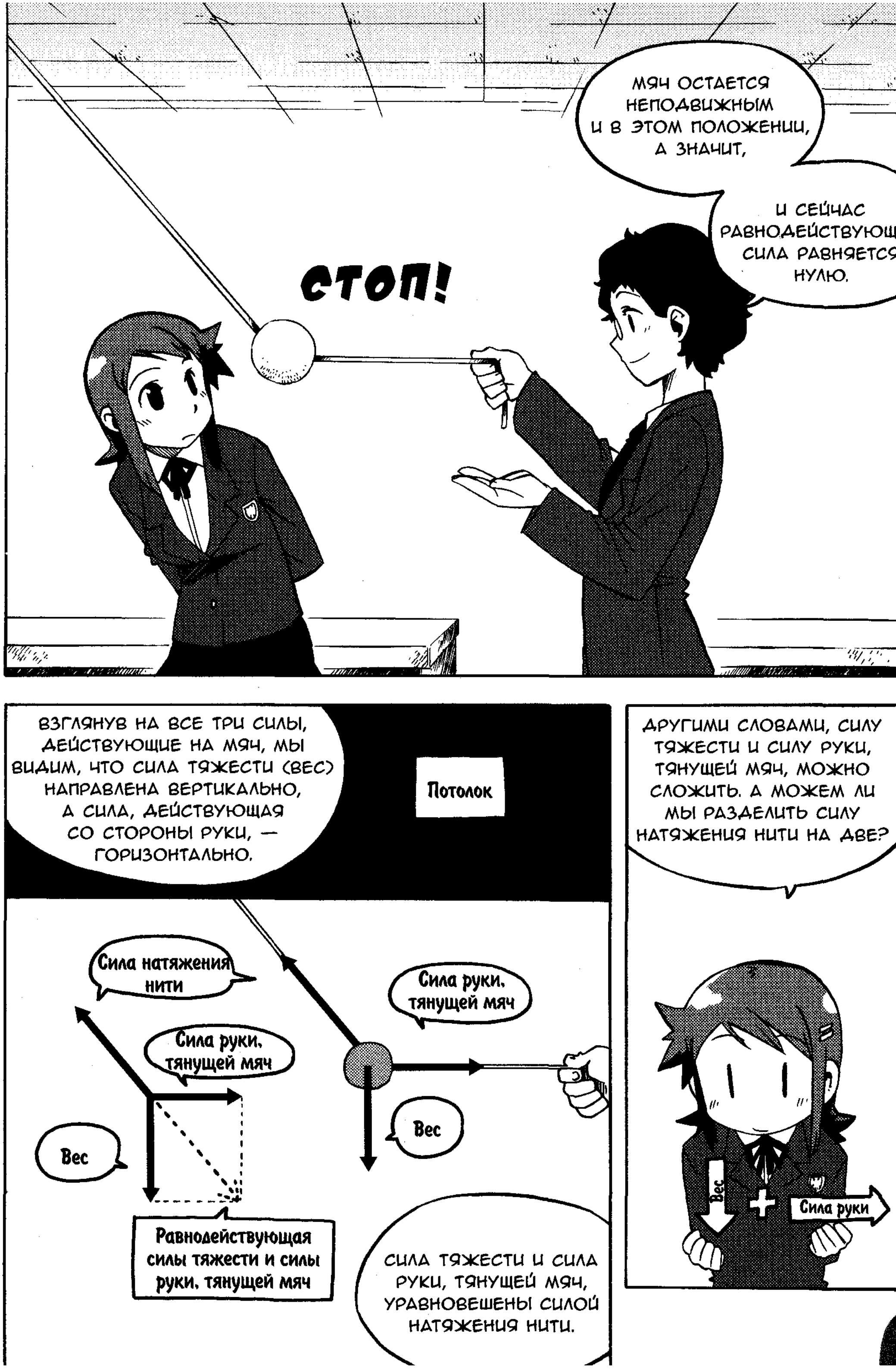
Теперь, Ниномия-сан, ты можешь рассчитать расстояние, пройденное при равноускоренном движении, не только по наитию, но и научным методом.

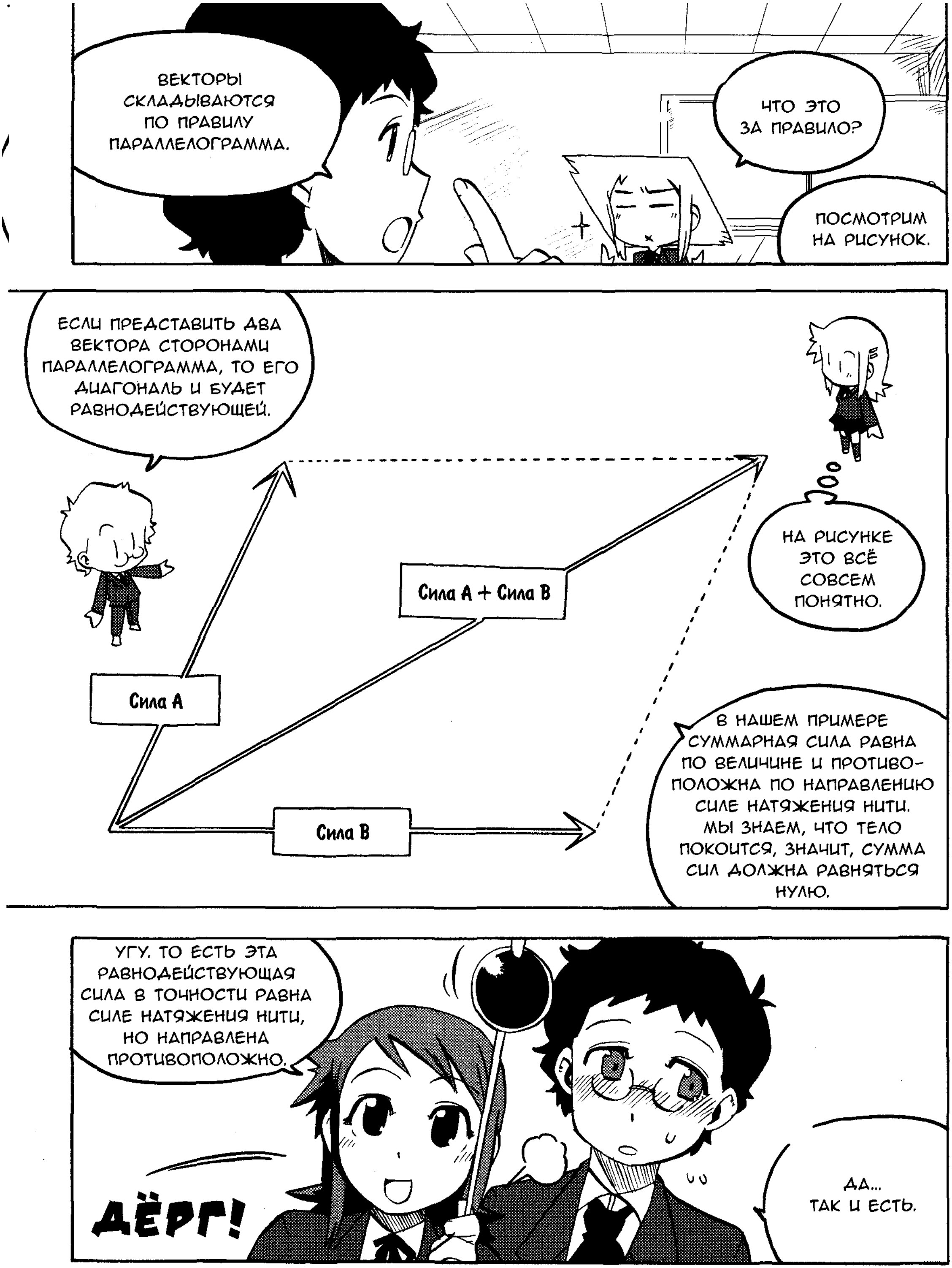
2.2. ПЕРВЫЙ И ВТОРОЙ ЗАКОНЫ НЬЮТОНА




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 НИТЯМИ.
ПРОСТИ. А Я-ТО ПОДУМАЛА, ЧТО ЭТО ПРИШЕЛЬЦЫ ИЗ КОСМОСА.
Потолок
Натяжение нити
Вес
Натяжение нити
+
Вес
0
Ноль
В ДАННЫЙ МОМЕНТ МЯЧ НЕПОДВИЖЕН.
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.
1
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.
ДЁРГ!
О-ПА


МЯЧ ОСТАЕТСЯ НЕПОДВИЖНЫМ И В ЭТОМ ПОЛОЖЕНИИ, А ЗНАЧИТ,
И СЕЙЧАС РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА РАВНЯЕТСЯ 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
Сила натяжения нити
Сила руки, тянущей мяч
Сила руки, тянущей мяч
Вес
Вес
Равнодействующая силы тяжести и силы руки, тянущей мяч
СИЛА ТЯЖЕСТИ И СИЛА РУКИ, ТЯНУЩЕЙ МЯЧ, УРАВНОВЕШЕНЫ СИЛОЙ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ.
ДРУГИМИ СЛОВАМИ, СИЛУ ТЯЖЕСТИ И СИЛУ РУКИ, ТЯНУЩЕЙ МЯЧ, МОЖНО СЛОЖИТЬ. А МОЖЕМ ЛИ МЫ РАЗДЕЛИТЬ СИЛУ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ НА ДВЕ?
Вес
Сила руки


ВЕКТОРЫ СКЛАДЫВАЮТСЯ ПО ПРАВИЛУ ПАРАЛЛЕЛОГРАММА.
ЧТО ЭТО ЗА ПРАВИЛО?
ПОСМОТРИМ НА РИСУНОК.
ЕСЛИ ПРЕДСТАВИТЬ ДВА ВЕКТОРА СТОРОНАМИ ПАРАЛЛЕЛОГРАММА, ТО ЕГО ДИАГОНАЛЬ И БУДЕТ РАВНОДЕЙСТВУЮЩЕЙ.
Сила А + Сила В
Сила А
Сила В
НА РИСУНКЕ ЭТО ВСЁ СОВСЕМ ПОНЯТНО.
В НАШЕМ ПРИМЕРЕ СУММАРНАЯ СИЛА РАВНА ПО ВЕЛИЧИНЕ И ПРОТИВОПОЛОЖНА ПО НАПРАВЛЕНИЮ СИЛЕ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ. МЫ ЗНАЕМ, ЧТО ТЕЛО ПОКОИТСЯ, ЗНАЧИТ, СУММА СИЛ ДОЛЖНА РАВНЯТЬСЯ НУЛЮ.
УГУ. ТО ЕСТЬ ЭТА РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА В ТОЧНОСТИ РАВНА СИЛЕ НАТЯЖЕНИЯ НИТИ, НО НАПРАВЛЕНА ПРОТИВОПОЛОЖНО.
ДЁРГ!
ДА... ТАК И ЕСТЬ.

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


В ОБЫЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЕ О ВОЗДУХ ИЛИ СТОЛКНОВЕНИЕ С ЗЕМЛЁЙ ОСТАНОВИТ ТЕЛО (ЕСЛИ К НЕМУ НЕ ПРИКЛАДЫВАТЬ СИЛУ).
СКРЯБ
СКРЯБ
СКРЯБ
СКРЯБ
СКРЯБ
Э-ГЕ-ГЕЙ!
НО В ГЛУБОКОМ КОСМОСЕ МОЖНО ДОСТИЧЬ СОСТОЯНИЯ С НУЛЕВОЙ ВНЕШНЕЙ СИЛОЙ, ТАК КАК ТАМ НЕ НУЖНО УЧИТЫВАТЬ ГРАВИТАЦИЮ ИЛИ СОПРОТИВЛЕНИЕ СРЕДЫ.
ДА, ТОЧНО! И ТОГДА МОЖНО ДВИГАТЬСЯ ВЕЧНО, ДАЖЕ НЕ ПРИКЛАДЫВАЯ СИЛУ?
МОЛОДЕЦ, ДОГАДАЛАСЬ!
С ЭТИМ ПАРНЕМ ВСЁ В ПОРЯДКЕ?
ДВИЖЕНИЕ ПО ПРЯМОЙ С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ, ТО ЕСТЬ "РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ", ВОЗМОЖНО ТОГДА, КОГДА РАВНОДЕЙСТВУЮЩАЯ СИЛА РАВНА НУЛЮ.
МАХ-МАХ
ПОХОЖЕ, ОН УХОДИТ.
ЧТО Ж...


КСТАТИ, В ЭТОМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ ЕЩЁ ОДНА ОСОБЕННОСТЬ ПЕРВОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА, О КОТОРОМ Я ТОЛЬКО ЧТО РАССКАЗЫВАЛ.
ДА?
ХЛОП!
ЕСЛИ РАВЕНСТВО СИЛЫ НУЛЮ ОЗНАЧАЕТ ОТСУТСТВИЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛ...
...ТО ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА НАЗЫВАЮТ ТАКЖЕ **ЗАКОНОМ ИНЕРЦИИ**.
Тело остаётся в состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения, если равнодействующая приложенных к телу сил равна нулю.
ЭТО СВОЙСТВО ТЕЛ СТРЕМИТЬСЯ ПРОДОЛЖАТЬ РАВНОМЕРНОЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОЕ ДВИЖЕНИЕ.
О!
ЗАКОН ИНЕРЦИИ? КАЖЕТСЯ, Я СЛЫШАЛА О НЁМ!
ДА!
ЭТО ТО ЖЕ САМОЕ, ЧТО И ПЕРВЫЙ ЗАКОН НЬЮТОНА!
ЭТО ВЕРНО.

ЗАКОН УСКОРЕНИЯ

$$F = ma$$

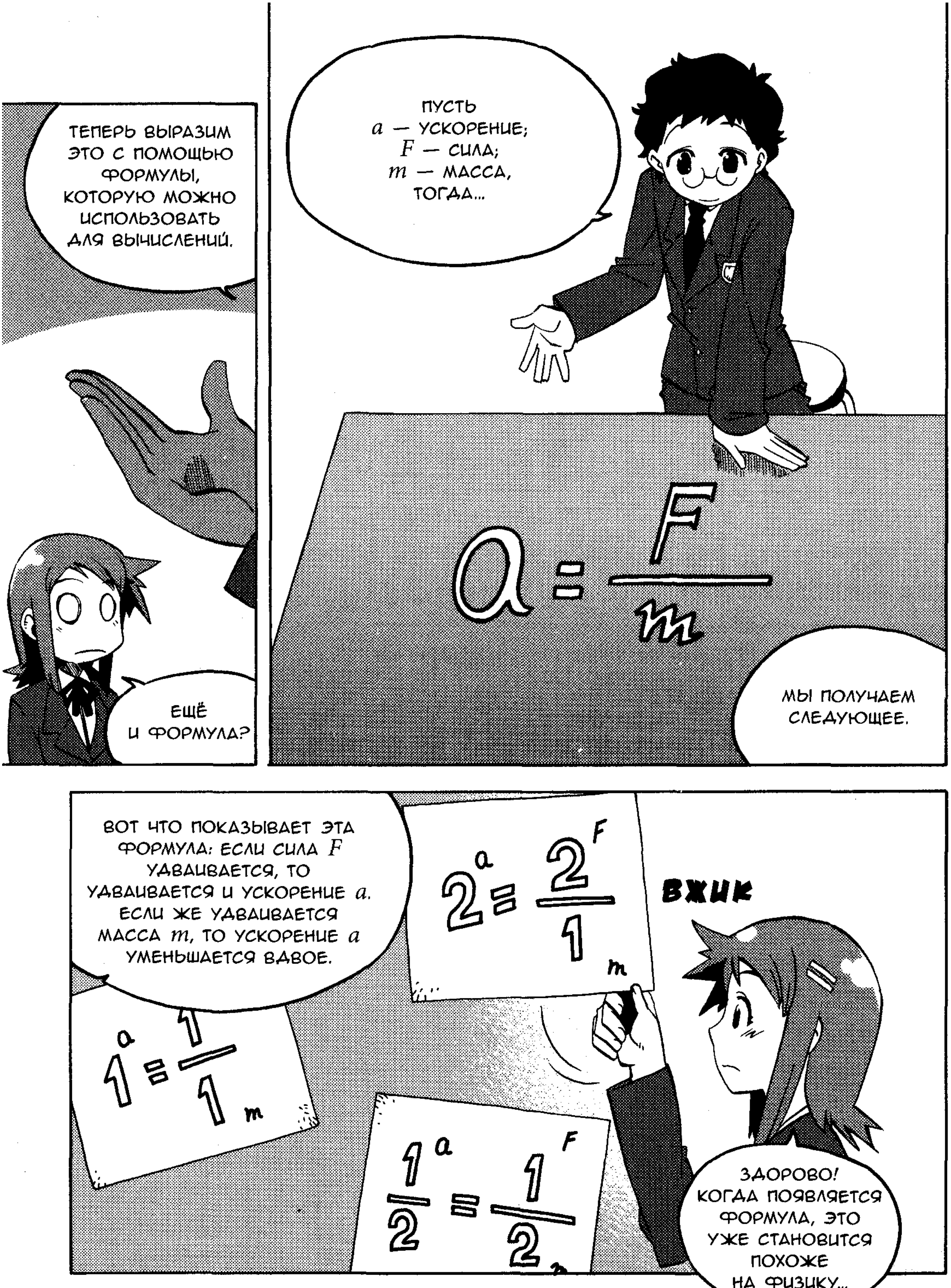

И ЧЕМ БОЛЬШЕ СИЛА, ТЕМ БОЛЬШЕ УСКОРЕНИЕ.
Я опаздываю... Нужно спешить!
ИНТУИЦИЯ ПОДСКАЗЫВАЕТ МНЕ ЭТО.


В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ, ЧТОБЫ ОСТАНОВИТЬ ВЕЛОСИПЕД, ТЕБЕ НУЖНО ПРИЛОЖИТЬ СИЛУ, НАПРАВЛЕННУЮ ПРОТИВ ТВОЕЙ СКОРОСТИ, — В ДЕЛО ВСТУПАЮТ ТОРМОЗА.
Впереди красный свет.
СОЗДАНИЕ УСКОРЕНИЯ, НАПРАВЛЕННОГО ПРОТИВ СКОРОСТИ (Т. Е. ОТРИЦАТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ, ИЛИ ЗАМЕДЛЕНИЯ), ПРИВОДИТ К УМЕНЬШЕНИЮ СКОРОСТИ, И ВЕЛОСИПЕД ОСТАНАВЛИВАЕТСЯ.
ТАКИМ ОБРАЗОМ, ТОРМОЖЕНИЕ СОЗДАЁТ ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ УСКОРЕНИЕ, А НЕ УМЕНЬШАЕТ ИЗНАЧАЛЬНОЕ.


ИСХОДЯ ИЗ ЭТИХ НАБЛЮДЕНИЙ, МЫ МОЖЕМ СКАЗАТЬ, ЧТО СИЛА ПРЯМО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА УСКОРЕНИЮ.
ДОБРОЕ УТРО!
ДОБРОЕ УТРО!
СОГЛАШУСЬ, ПОЖАЛУЙ!


ПЕРЕЙДЁМ К ВЕСУ.
УХ!
ЭТО ЧТО-ТО БОЛЬШОЕ И ТЯЖЁЛОЕ!
С ТЯЖЁЛЫМ ГРУЗОМ В КОРЗИНЕ ТЕБЕ ПРИХОДИТСЯ ПРИЛОЖИТЬ БОЛЬШУЮ СИЛУ, ЧТОБЫ НАЧАТЬ КРУТИТЬ ПЕДАЛИ.
ОХ ОХ ОХ
СКРИП
СКРИП
ШАТЬ-ПОШАТЬ
КАК ВИДИШЬ, С ГРУЗОМ УСКОРЯТЬСЯ СЛОЖНЕЕ.
ПЫХ
ПЫХ
ПЫХ
ФЬЮ
ОТСЮДА МОЖНО ПРЕДПОЛОЖИТЬ, ЧТО ВЕС И УСКОРЕНИЕ ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫ ДРУГ ДРУГУ.
ИЛИ, ЗАМЕНЯЯ ВЕС НА "МАССУ", МАССА И УСКОРЕНИЕ ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫ ДРУГ ДРУГУ.
ПОДОЖДИ, А В ЧЁМ РАЗНИЦА МЕЖДУ ВЕСОМ И МАССОЙ?
ПРОЩЕ ГОВОРЯ, ВЕС — ЭТО СИЛА, С КОТОРОЙ ТЕЛО ДЕЙСТВУЕТ НА ОПОРУ ИЗ-ЗА НАЛИЧИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ.
ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО ВЕС ТЕЛА НА ЛУНЕ И НА ЗЕМЛЕ БУДЕТ РАЗНЫМ.
А МАССА?


А МАССА — ОДИНАКОВОЙ. В СОСТОЯНИИ НЕВЕСОМОСТИ ВЕС ТЕЛА БУДЕТ РАВЕН НУЛЮ.
ОДНАКО, ЧТОБЫ ЕГО СДВИНУТЬ, ВСЁ РАВНО НУЖНО ПРИЛОЖИТЬ СИЛУ...
ПОЧЕМУ?
ПОТОМУ ЧТО ТЕЛО ОБЛАДАЕТ ИНЕРТНОСТЬЮ, КОТОРАЯ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ЕГО МАССОЙ.
ПАМ
ВЕС И МАССА КАЖУТСЯ ПОХОЖИМИ, НО ОЗНАЧАЮТ РАЗНОЕ, НЕ ТАК ЛИ?
ПОДВЕДЁМ ИТОГ ТОГО, ЧТО МЫ НА ДАННЫЙ МОМЕНТ УЗНАЛИ.
ШРР
ДАВАЙ ПОДВЕДЁМ!
Ускорение тела пропорционально приложенной к нему силе и обратно пропорционально его массе.
ЭТО ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА.
АГА, ПОМНЮ.
СУДЯ ПО ТВОЕМУ ЛИЦУ, ОДЕЖДА ТЕБЕ НРАВИТСЯ.
О ДА!


ТЕПЕРЬ ВЫРАЗИМ ЭТО С ПОМОЩЬЮ ФОРМУЛЫ, КОТОРУЮ МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ.
ПУСТЬ a — УСКОРЕНИЕ; F — СИЛА; m — МАССА, ТОГДА...
ЕЩЁ И ФОРМУЛА?
$a = \frac{F}{m}$
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 ВДВОЕ.
ВЖИК
ЗДОРОВО! КОГДА ПОЯВЛЯЕТСЯ ФОРМУЛА, ЭТО УЖЕ СТАНОВИТСЯ ПОХОЖЕ НА ФИЗИКУ...


ЩЁЛК
ЩЁЛК
О, ВСЁ НЕ ТАК СЛОЖНО. ДАВАЙ ЕЁ ПЕРЕПИШЕМ,
И ПОЛУЧИМ УРАВНЕНИЕ ВОТ В ТАКОМ ВИДЕ
ma=F
ТАК, ТОГДА...
ЭТО БУДЕТ ЗВУЧАТЬ ТАК...
СИЛА РАВНА МАССЕ, УМНОЖЕННОЙ НА УСКОРЕНИЕ,
ВЕРНО?
АБСОЛЮТНО.
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ УРАВНЕНИЕМ ДВИЖЕНИЯ, КОТОРОЕ ВЫРАЖАЕТ ВТОРОЙ ЗАКОН НЬЮТОНА В БОЛЕЕ СЖАТОЙ И ЧЁТКОЙ ФОРМЕ.
НО МНЕ ВСЁ ЖЕ ТРУДНО ПРЕДСТАВИТЬ, КАК ПРОИЗВЕДЕНИЕ МАССЫ И УСКОРЕНИЯ СТАНОВИТСЯ СИЛОЙ.


ДА, ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ТРУДНО ПОДОБРАТЬ ПРИМЕР ИЗ РЕАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ.
ВОТ ТЕБЕ И НА...
ВОТ ВИДИШЬ!.
ОДНАКО МЫ ИСПОЛЬЗОВАЛИ СЛОВО **СИЛА** В РАСПЛЫВЧАТОМ СМЫСЛЕ.
И ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ ДАТЬ ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ В ФИЗИКЕ, НЕОБХОДИМО ИСПОЛЬЗОВАТЬ УРАВНЕНИЕ **СИЛА = МАССА × × УСКОРЕНИЕ**.
ТО ЕСТЬ ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ — ЭТО УМНОЖЕНИЕ МАССЫ НА УСКОРЕНИЕ?
ДА, Я ЭТО И ИМЕЮ В ВИДУ!
ТОЧНО ТАК ЖЕ МОЖНО НАЙТИ МАССУ ПО ФОРМУЛЕ **МАССА = = СИЛА/УСКОРЕНИЕ**.
ПИ-И-И
ПШИК-ПШИК-ПШИК!
РАССМОТРИМ-КА ПРИМЕР ИЗ ЖИЗНИ.
ДАВАЙ ПОПРОБУЕМ!

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!

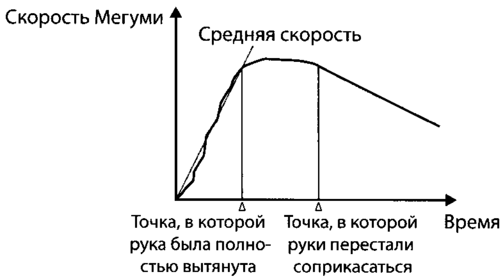
Да нет же, я просто придумываю возможную ситуацию.

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...

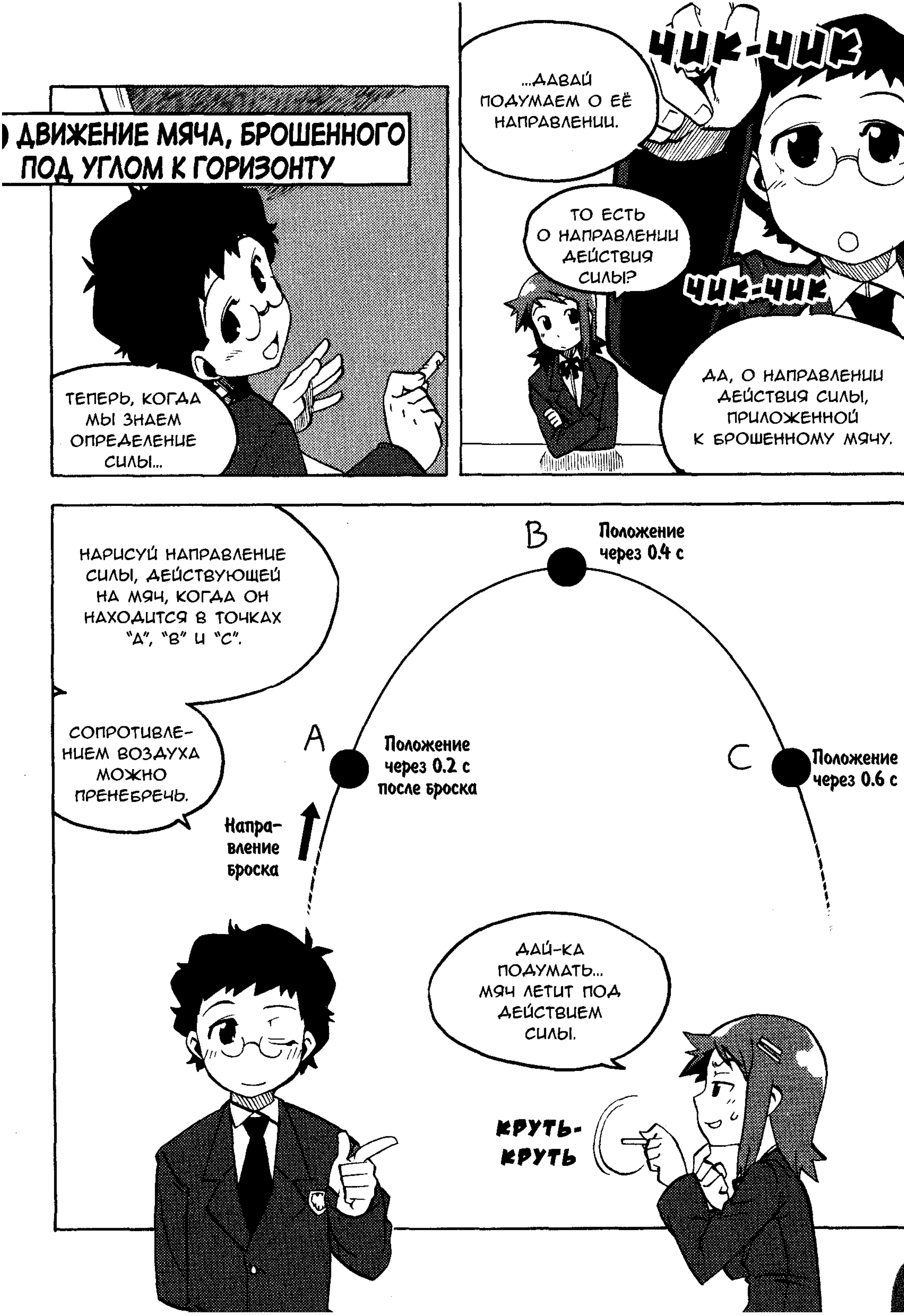
Если движение равноускоренное, то ускорение можно найти по формуле «ускорение = изменение скорости / время», не так ли? Положим, что ускорение, которое ты получила под действием силы от моих рук, составило 0.6 м/с^2. Умножив его на массу твоего тела, равную 40 кг, получим

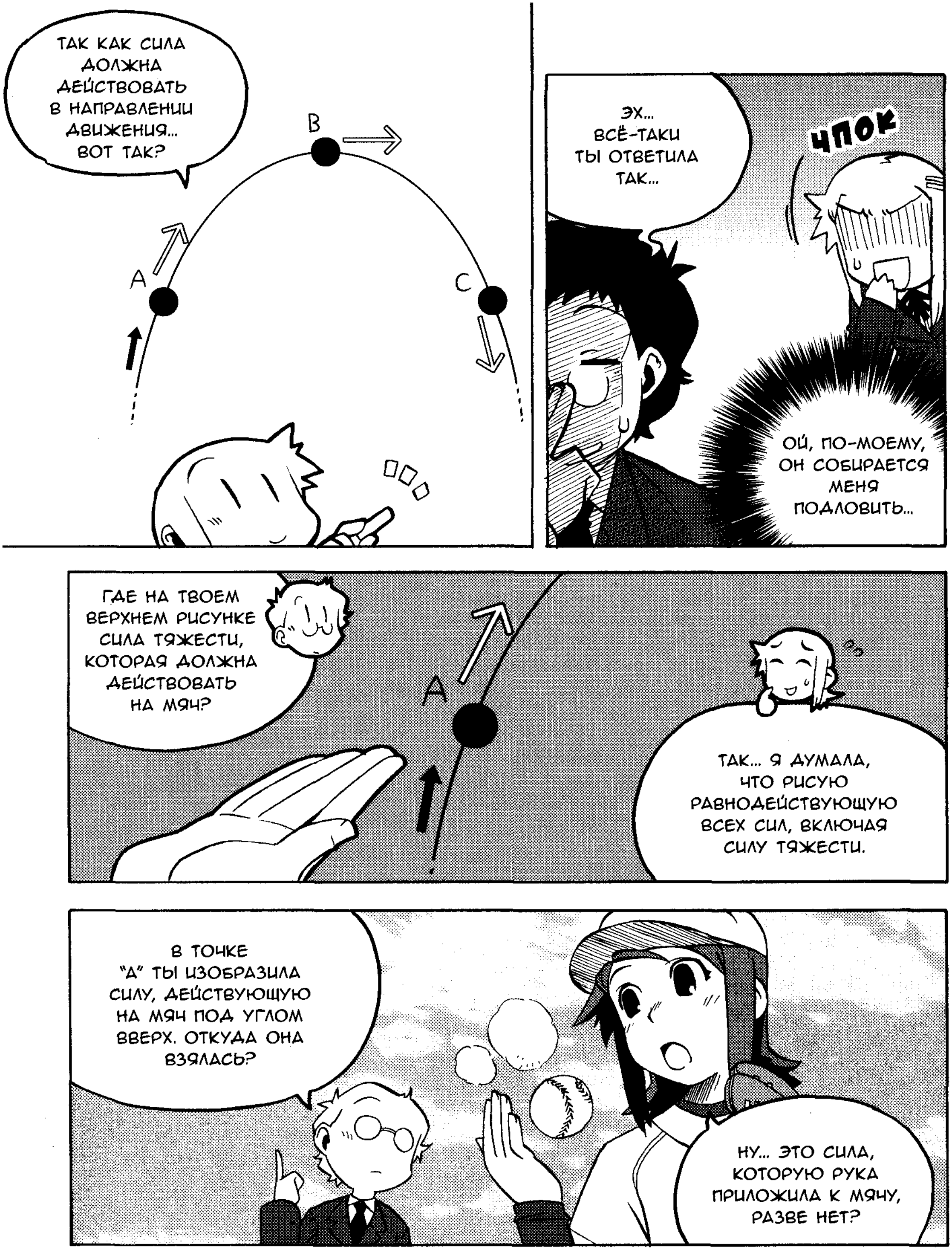
$$F = ma = 40 \text{ кг} \times 0.6 \text{ м/с}^2 = 24 \text{ (кг·м/с}^2\text{)}, \text{ или } 24 \text{ Н}.$$

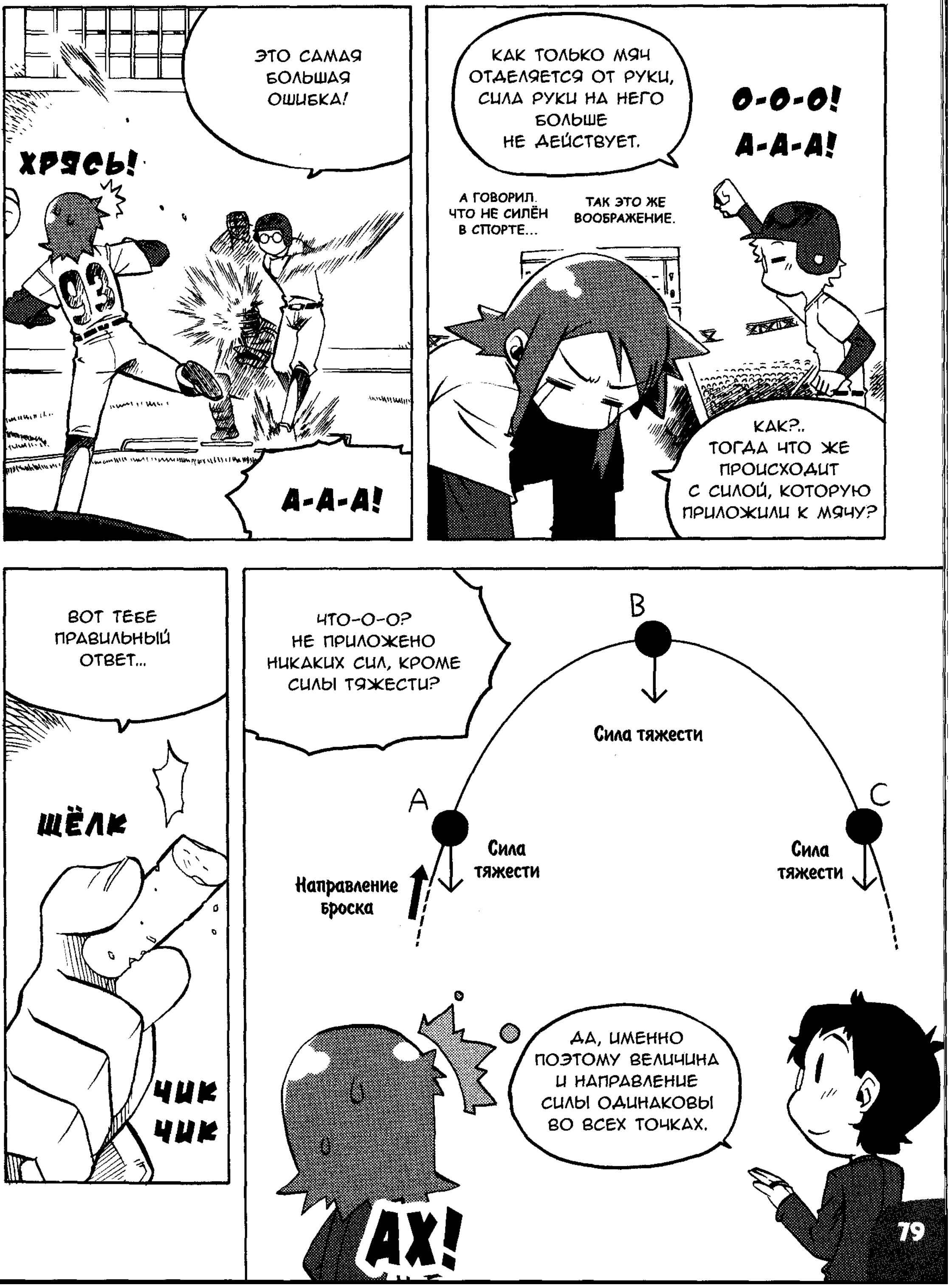
Значит, сила, которую я приложила к тебе, была равна 24 Н. Вот оно что! Мы смогли определить точное значение силы.

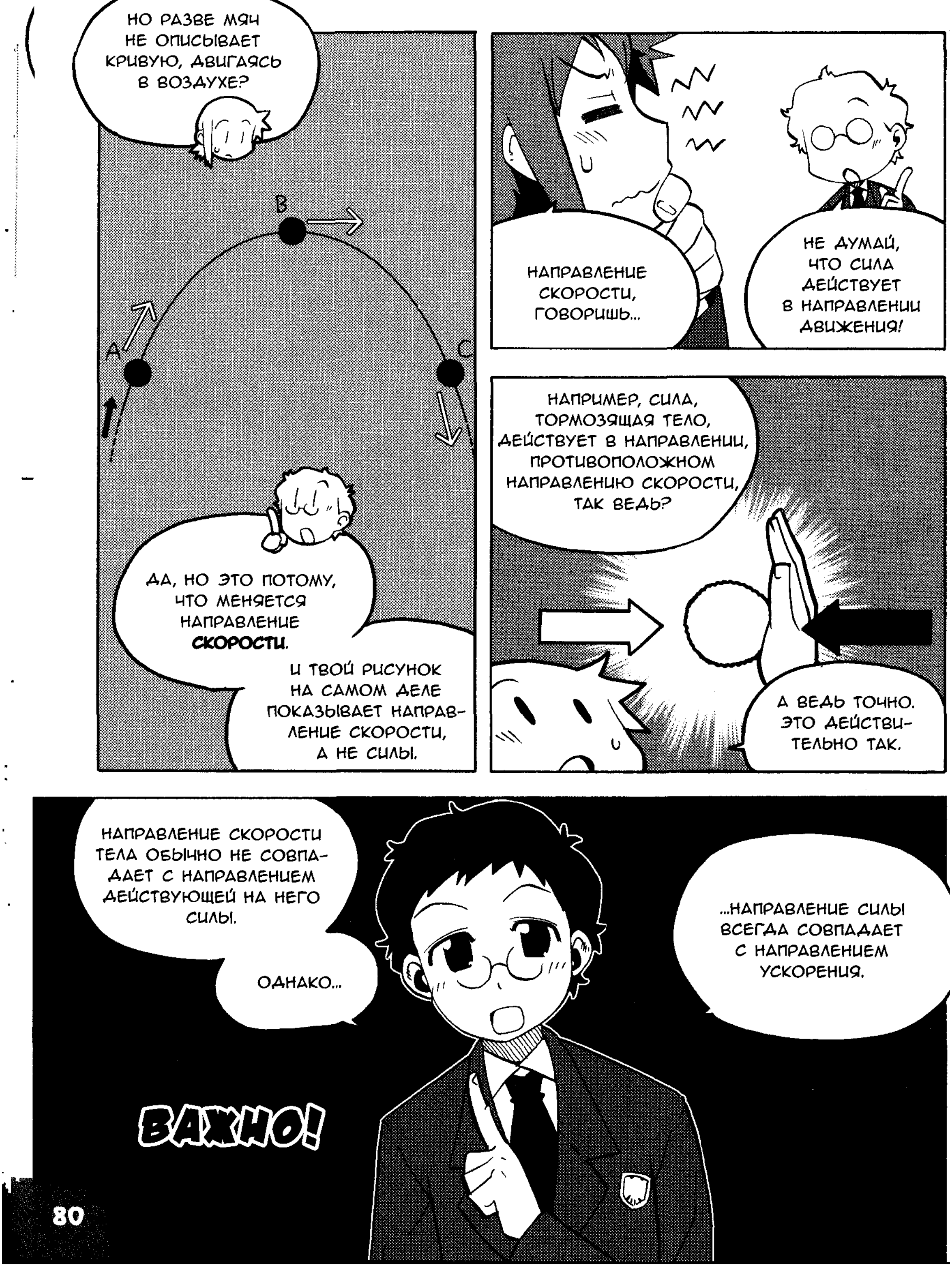
Таким образом, значение силы может быть получено измерением ускорения, которое тело получило под её действием, и последующим умножением на массу этого тела. Этот метод можно использовать и для измерения других сил.

ДВИЖЕНИЕ МЯЧА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ



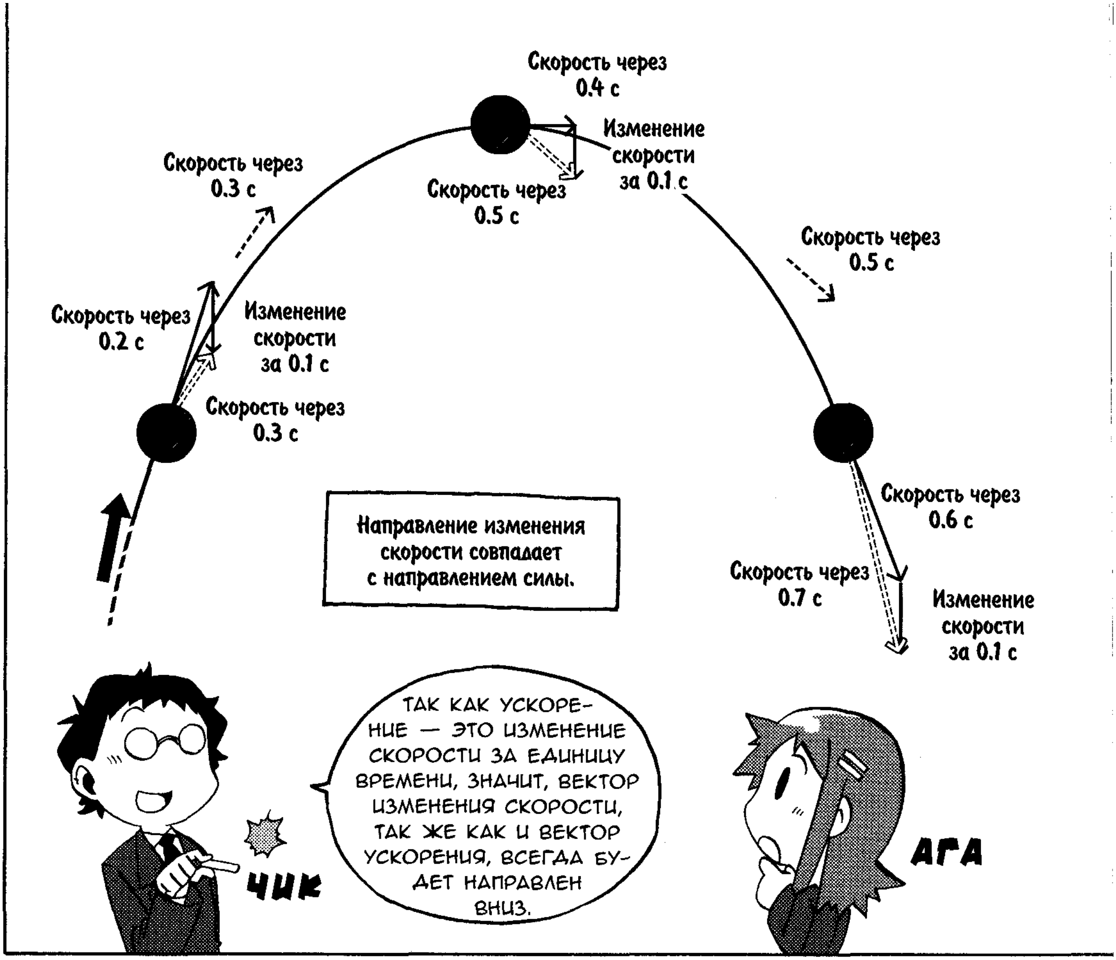

ТАК КАК СИЛА ДОЛЖНА ДЕЙСТВОВАТЬ В НАПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЯ... ВОТ ТАК?
B
A
C
ЭХ... ВСЁ-ТАКИ ТЫ ОТВЕТИЛА ТАК...
ЧПОК
ОЙ, ПО-МОЕМУ, ОН СОБИРАЕТСЯ МЕНЯ ПОДЛОВИТЬ...
ГДЕ НА ТВОЕМ ВЕРХНЕМ РИСУНКЕ СИЛА ТЯЖЕСТИ, КОТОРАЯ ДОЛЖНА ДЕЙСТВОВАТЬ НА МЯЧ?
A
ТАК... Я ДУМАЛА, ЧТО РИСУЮ РАВНОДЕЙСТВУЮЩУЮ ВСЕХ СИЛ, ВКЛЮЧАЯ СИЛУ 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?


ЭТО САМАЯ БОЛЬШАЯ ОШИБКА!
ХРЯСЬ!
А-А-А!
КАК ТОЛЬКО МЯЧ ОТДЕЛЯЕТСЯ ОТ РУКИ, СИЛА РУКИ НА НЕГО БОЛЬШЕ НЕ ДЕЙСТВУЕТ.
О-О-О!
А-А-А!
А ГОВОРИЛ, ЧТО НЕ СИЛЁН В СПОРТЕ...
ТАК ЭТО ЖЕ ВООБРАЖЕНИЕ.
КАК?.. ТОГДА ЧТО ЖЕ ПРОИСХОДИТ С СИЛОЙ, КОТОРУЮ ПРИЛОЖИЛИ К МЯЧУ?
ВОТ ТЕБЕ ПРАВИЛЬНЫЙ ОТВЕТ...
ЩЁЛК
ЧИК ЧИК
ЧТО-О-О? НЕ ПРИЛОЖЕНО НИКАКИХ СИЛ, КРОМЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ?
B
Сила тяжести
A
Сила тяжести
Направление броска
C
Сила тяжести
ДА, ИМЕННО ПОЭТОМУ ВЕЛИЧИНА И НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ ОДИНАКОВЫ ВО ВСЕХ ТОЧКАХ.
АХ!

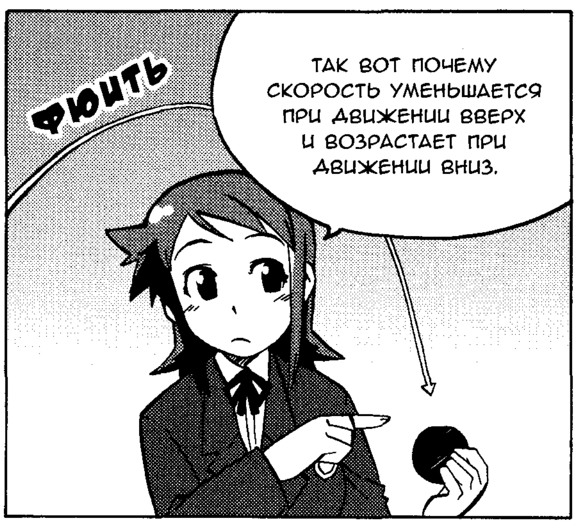

НО РАЗВЕ МЯЧ НЕ ОПИСЫВАЕТ КРИВУЮ, ДВИГАЯСЬ В ВОЗДУХЕ?
B
A
C
ДА, НО ЭТО ПОТОМУ, ЧТО МЕНЯЕТСЯ НАПРАВЛЕНИЕ **СКОРОСТИ**.
И ТВОЙ РИСУНОК НА САМОМ ДЕЛЕ ПОКАЗЫВАЕТ НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ, А НЕ СИЛЫ.
НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ, ГОВОРИШЬ...
НЕ ДУМАЙ, ЧТО СИЛА ДЕЙСТВУЕТ В НАПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЯ!
НАПРИМЕР, СИЛА, ТОРМОЗЯЩАЯ ТЕЛО, ДЕЙСТВУЕТ В НАПРАВЛЕНИИ, ПРОТИВОПОЛОЖНОМ НАПРАВЛЕНИЮ СКОРОСТИ, ТАК ВЕДЬ?
А ВЕДЬ ТОЧНО. ЭТО ДЕЙСТВИТЕЛЬНО ТАК.
НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЛА ОБЫЧНО НЕ СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ НА НЕГО СИЛЫ.
ОДНАКО...
...НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ ВСЕГДА СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ УСКОРЕНИЯ.
ВАЖНО!

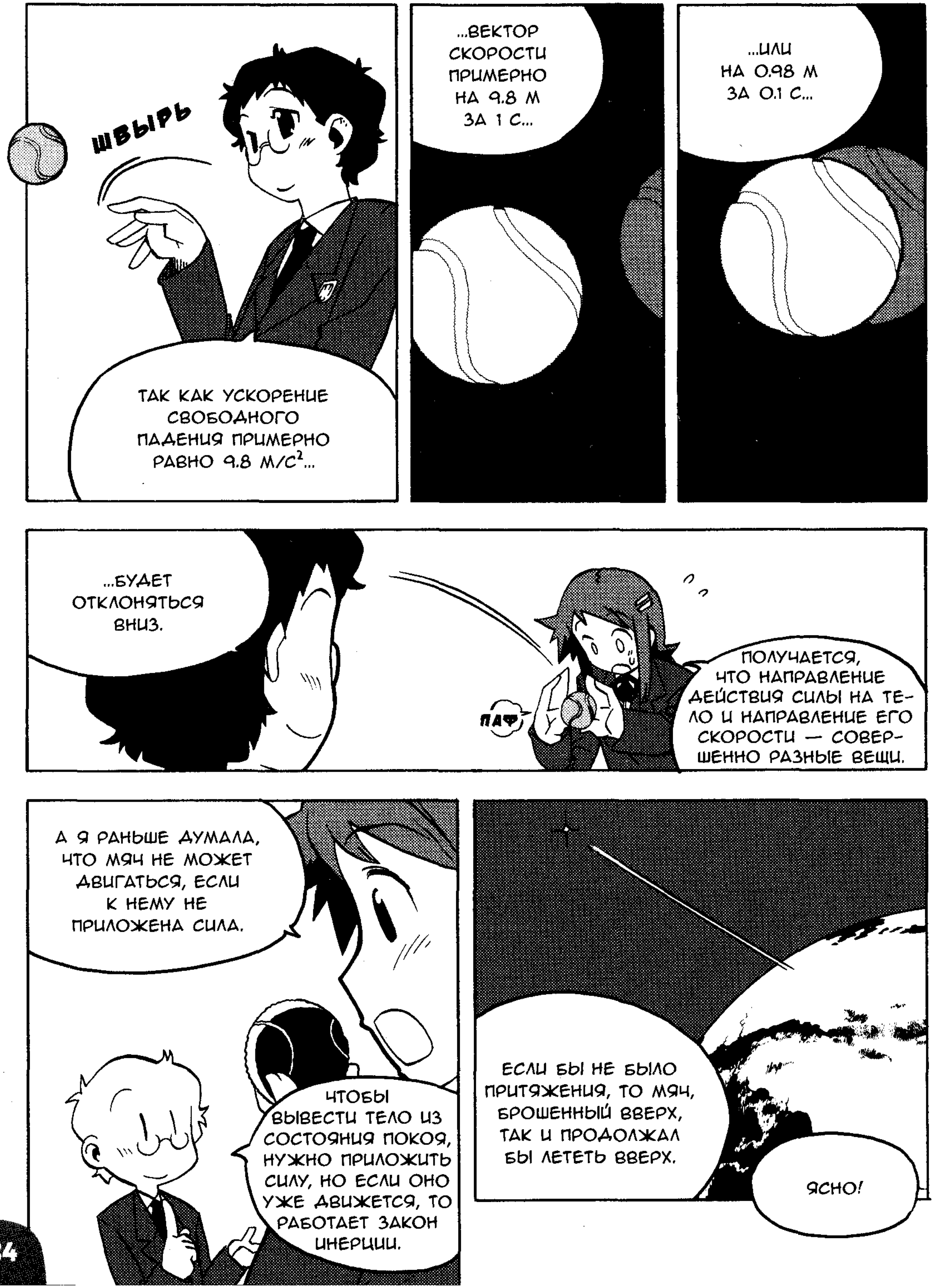
ЧТО? ЗНАЧИТ...
ВСЕ ВЕКТОРЫ Я ИЗОБРАЗИЛА ОДИНАКОВОЙ ДЛИНЫ...
...НО ЕСЛИ ЭТИ ВЕКТОРЫ ПОКАЗЫВАЮТ НАПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТИ, ТО ВСЕ ОНИ ДОЛЖНЫ БЫТЬ РАЗНОЙ ДЛИНЫ, ТАК?
ЭТО ТЫ ВЕРНО ЗАМЕТИЛА.
ПОСМОТРИМ, КАК ДВИЖЕТСЯ МЯЧ.
КОГДА МЯЧ ПОДНИМАЕТСЯ ВВЕРХ, ЕГО СКОРОСТЬ ПОСТЕПЕННО УМЕНЬШАЕТСЯ.
А КОГДА НАЧИНАЕТ ПАДАТЬ, ТО ОПЯТЬ ВОЗРАСТАЕТ.
ДА, ЭТО ТАК!
ЧТОБЫ ОПРЕДЕЛИТЬ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ, НЕОБХОДИМО РАССМОТРЕТЬ УСКОРЕНИЕ.
ТО ЕСТЬ ЭТО УСКОРЕНИЕ ТЕЛА, ПАДАЮЩЕГО ВНИЗ.
ПАФ
МЯЧ УСКОРЯЕТСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ?

ЭТО УСКОРЕНИЕ НАЗЫВАЕТСЯ "УСКОРЕНИЕМ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ" И ОБОЗНАЧАЕТСЯ ЛАТИНСКОЙ БУКВОЙ g. ОНО РАВНО ПРИБЛИЗИТЕЛЬНО 9.8 М/С^2.
ТО ЕСТЬ ОНО НЕИЗМЕННО?
УСКОРЕНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ НЕ ЗАВИСИТ ОТ МАССЫ ТЕЛА.
ЛЮБОЕ ТЕЛО ВСЕГДА ПАДАЕТ ВНИЗ С УСКОРЕНИЕМ 9.8 М/С^2, ПОКА ОНО НАХОДИТСЯ ВБЛИЗИ ЗЕМЛИ!
АГА...
ЕСЛИ ТЫ ИЗМЕРИШЬ УСКОРЕНИЕ ЛЮБОГО ПАДАЮЩЕГО ТЕЛА, ТО ОБНАРУЖИШЬ, ЧТО ОНО ВСЕГДА РАВНО 9.8 М/С^2.
ДАВАЙ-ДАВАЙ!
ЩЁЛК ЩЁЛК
ДАЙ-КА Я НАРИСУЮ ВЕКТОРЫ, ПОКАЗЫВАЮЩИЕ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАПРАВЛЕННОГО ВНИЗ УСКОРЕНИЯ.
ЧИК ЧИК
ЧИК ЧИК


Скорость через 0.4 с
Изменение скорости за 0.1 с
Скорость через 0.3 с
Скорость через 0.5 с
Скорость через 0.5 с
Скорость через 0.2 с
Изменение скорости за 0.1 с
Скорость через 0.3 с
Направление изменения скорости совпадает с направлением силы.
Скорость через 0.6 с
Скорость через 0.7 с
Изменение скорости за 0.1 с
ТАК КАК УСКОРЕНИЕ — ЭТО ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ЗА ЕДИНИЦУ ВРЕМЕНИ, ЗНАЧИТ, ВЕКТОР ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ, ТАК ЖЕ КАК И ВЕКТОР УСКОРЕНИЯ, ВСЕГДА БУДЕТ НАПРАВЛЕН ВНИЗ.
ЧИК
АГА


КАК ПОКАЗАНО ПУНКТИРНЫМИ СТРЕЛКАМИ, ВЕКТОР СКОРОСТИ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ БУДЕТ ВСЁ БОЛЬШЕ ОТКЛОНЯТЬСЯ ВНИЗ.
Скорость через 0.4 с
Изменение скорости за 0.1 с
Скорость через 0.5 с


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


ШВЫРЬ
ТАК КАК УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИМЕРНО РАВНО 9.8 М/С^2...
...ВЕКТОР СКОРОСТИ ПРИМЕРНО НА 9.8 М ЗА 1 С...
...ИЛИ НА 0.98 М ЗА 0.1 С...
...БУДЕТ ОТКЛОНЯТЬСЯ ВНИЗ.
ПАФ
ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО НАПРАВЛЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ НА ТЕЛО И НАПРАВЛЕНИЕ ЕГО СКОРОСТИ — СОВЕРШЕННО РАЗНЫЕ ВЕЩИ.
А Я РАНЬШЕ ДУМАЛА, ЧТО МЯЧ НЕ МОЖЕТ ДВИГАТЬСЯ, ЕСЛИ К НЕМУ НЕ ПРИЛОЖЕНА СИЛА.
ЧТОБЫ ВЫВЕСТИ ТЕЛО ИЗ СОСТОЯНИЯ ПОКОЯ, НУЖНО ПРИЛОЖИТЬ СИЛУ, НО ЕСЛИ ОНО УЖЕ ДВИЖЕТСЯ, ТО РАБОТАЕТ ЗАКОН ИНЕРЦИИ.
ЕСЛИ БЫ НЕ БЫЛО ПРИТЯЖЕНИЯ, ТО МЯЧ, БРОШЕННЫЙ ВВЕРХ, ТАК И ПРОДОЛЖАЛ БЫ ЛЕТЕТЬ ВВЕРХ.
ЯСНО!

А СЕЙЧАС МОГУ Я КОЕ-ЧТО СПРОСИТЬ У ТЕБЯ, НИНОМИЯ-САН?
ПОНИМАЕШЬ ЛИ ТЫ РАЗНИЦУ МЕЖДУ "СИЛОЙ" В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ И ТОЙ "СИЛОЙ", О КОТОРОЙ ИДЁТ РЕЧЬ В ФИЗИКЕ?
ДА, БЛАГОДАРЯ ТВОИМ РАЗЪЯСНЕНИЯМ ЭТО ВПОЛНЕ ПОНЯТНО.
ИТАК, МЫ В ОБЩИХ ЧЕРТАХ ИЗУЧИЛИ ТРИ ЗАКОНА НЬЮТОНА: ЗАКОН ИНЕРЦИИ, ЗАКОН УСКОРЕНИЯ, ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ.
ГИП-ГИП УРА!
И ТЫ ОБЪЯСНИЛ ЭТО ТАК ДОХОДЧИВО, НОНОМУРА-КУН.
ВСЕГДА РАД ПОМОЧЬ.


МЕХАНИКА БЕЗ ПРЕУВЕЛИЧЕНИЯ ОСНОВАНА НА ТРЁХ 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 ЗАСИДЕ-ЛИСЬ!
...ЭТИ ДВОЕ...
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:

$$v = at + v_0; \tag{1}$$

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

$$v^2 - v_0{}^2 = 2ax. \tag{3}$$

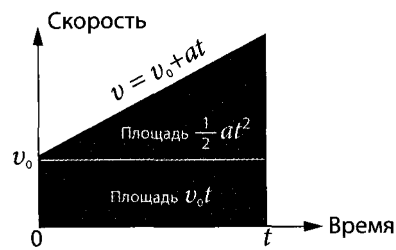
Давай выведем эти уравнения. Начнём с уравнения (1). Если ускорение постоянно, то можно записать:

изменение скорости = ускорение × время.

Так как изменение скорости равно $v - v_0$, ускорение равно a, а время t, то из соотношения «изменение скорости = ускорение × 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 — $\frac{1}{2}at^2$, то мы получаем равенство, соответствующее уравнению (2):

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

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:

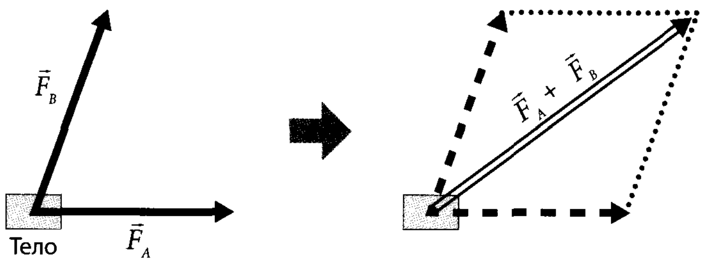
$$x = v_0\left(\frac{v - v_0}{a}\right) + \frac{1}{2}a\left(\frac{v - v_0}{a}\right)^2 = \frac{(2v_0v - 2v_0^2) + (v^2 - 2v_0v + v_0^2)}{2a} = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

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

СЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ ПО ПРАВИЛУ ПАРАЛЛЕЛОГРАММА

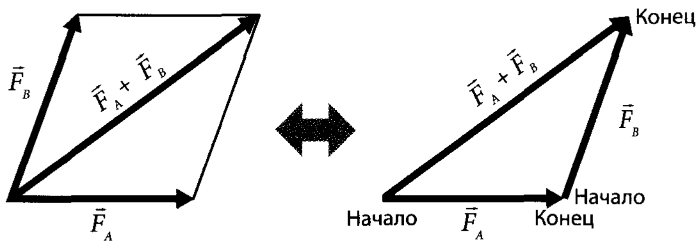
Так как сила — вектор, то расчёты нужно проводить согласно правилам обращения с векторами, описанными в Главе 1. Если два вектора лежат на одной прямой, то складывать их легко — их модули нужно либо сложить, либо вычесть, если они противонаправленны (см. Глава 1).

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.

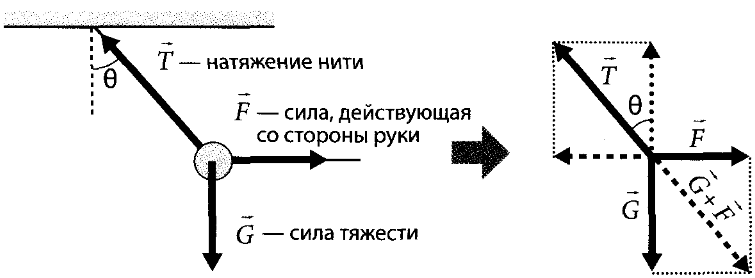


Это правило применимо для сложения не только сил, но и любых векторов. Другими словами, по правилу параллелограмма производится сложение двух векторов любой природы.

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 вектора. 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 — G, сила, с которой рука тянет груз в горизонтальном направлении, — F, и сила натяжения нити — T. Так как груз неподвижен, эти три силы уравновешены. Таким образом, векторное сложение этих сил даёт ноль:

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

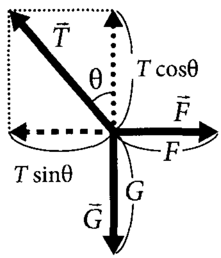
Это равенство можно переписать следующим образом:

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

Теперь вернёмся к нашему рисунку и рассмотрим его с учётом горизонтальной и вертикальной составляющих. Так как тело покоится, 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, тянущей 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:

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

Из условия равновесия вертикальных составляющих сил следует:

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

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 покоиться 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 преобразования 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.

НАПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТИ, УСКОРЕНИЯ И СИЛЫ

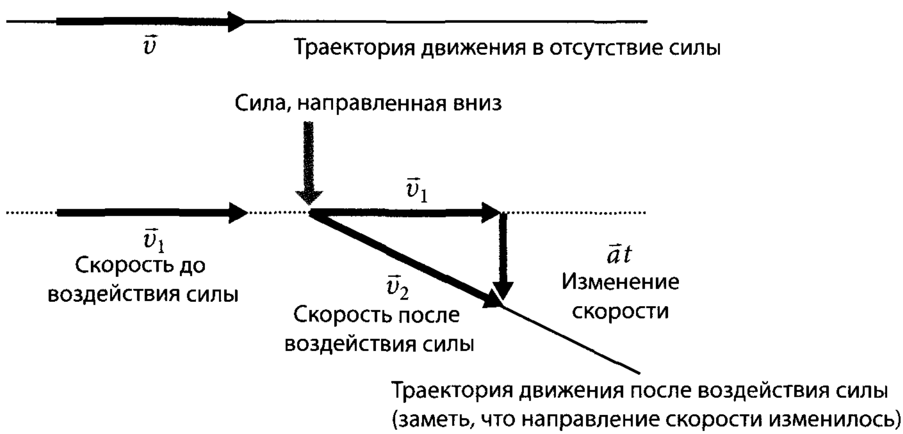
Согласно второму закону Ньютона направление ускорения всегда совпадает с направлением силы. Однако направление скорости не зависит напрямую от направлений силы или ускорения. Из соотношения между ускорением и скоростью (введённым на стр. 52) следует равенство

изменение скорости = ускорение × время.

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

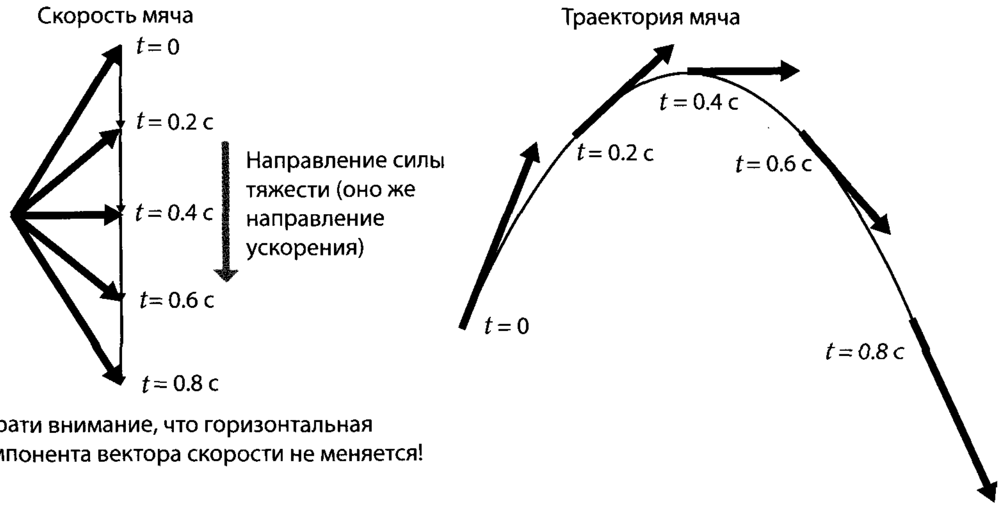
Обратимся к примеру. Предположим, что тело движется с постоянной горизонтально направленной скоростью $\vec{v}_1$. На него не действует сила, оно движется с этой скоростью по прямой линии в соответствии с первым законом Ньютона. Но как изменится скорость тела, если на него в течение времени t действует 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:

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



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.

ЕДИНИЦА СИЛЫ – НЬЮТОН (Н)

Единица силы определена на основе уравнения движения:

сила = масса × ускорение.

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

1 ньютон = 1 (кг × м/с^2).

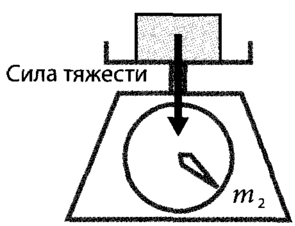
Как ты можешь догадаться, эта единица получила своё название в честь великого учёного Исаака Ньютона, заложившего основы физики. Сила в 1 Н эквивалентна силе, необходимой для придания телу массой 1 кг ускорения 1 м/с^2.

КАК ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ МАССА И СИЛА

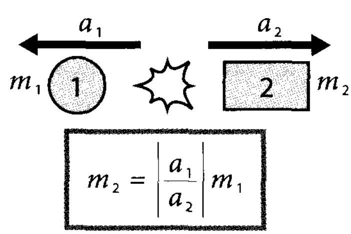
Как определить массу тела? Считается, что массу тела можно измерить, например, с помощью весов, но при таком измерении используется известный из опыта факт: сила тяжести, действующая на тело, пропорциональна его массе. Масса, измеренная с помощью силы тяжести, носит название гравитационной.

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 провзаимодействовало с контрольным телом через столкновение. В этом столкновении внешние силы на тела не действуют.



Гравитационная масса



Инерционная масса

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 идее 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,

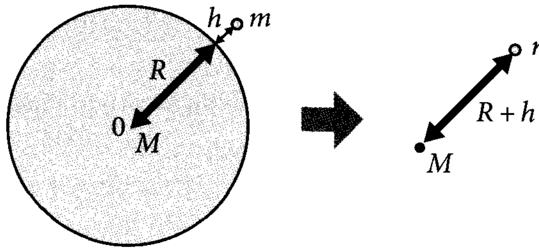
мы определим силу.

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 однородной 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.

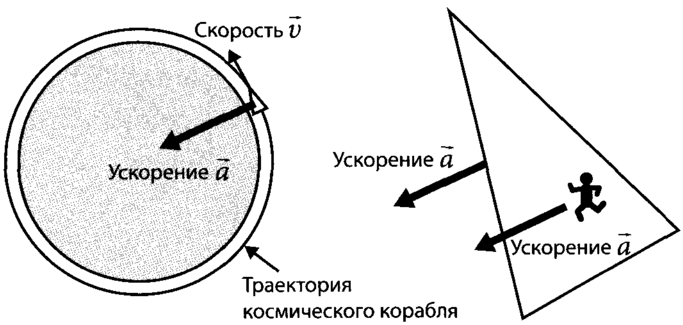
Кстати, каково будет ускорение свободного падения на высоте орбиты космического челнока «Шаттл»? Высота орбиты «Шаттла» от поверхности Земли составляет что-то около 300...500 км. Если принять h = 500 км, то

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

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

$$g = G\frac{M}{(R+h)^2} = 6.67\times10^{-11}\times\frac{5.98\times10^{24}}{(6.88\times10^6)^2} \approx 8.4 \text{ м/с}^2.$$

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:

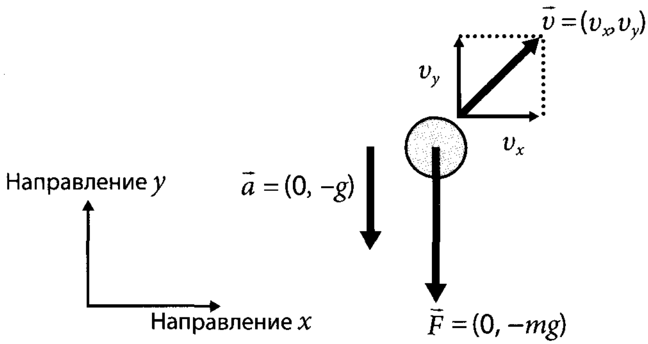
$$F = (\overset{\text{сила в направлении } x}{0}, \underset{\text{сила в направлении } y}{-mg}).$$

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

$$ma_x = 0;$$
$$ma_y = -mg.$$

Отсюда получаем

Ускорение в направлении x: $a_x = 0$;
Ускорение в направлении y: $a_y = -g$.

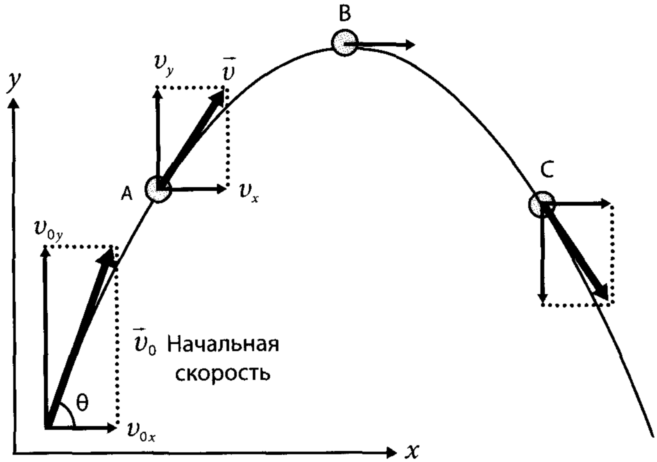


То есть мяч движется с постоянной скоростью в направлении x, а в направлении y движение равноускоренное.

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

$$v_x = v_{0x};$$
$$v_y = v_{0y} - gt.$$

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 м/с^2 × 1 с = –9.8 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:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \tag{4}$$

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:

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

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:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}. \tag{6}$$

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

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}. \tag{7}$$

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

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

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

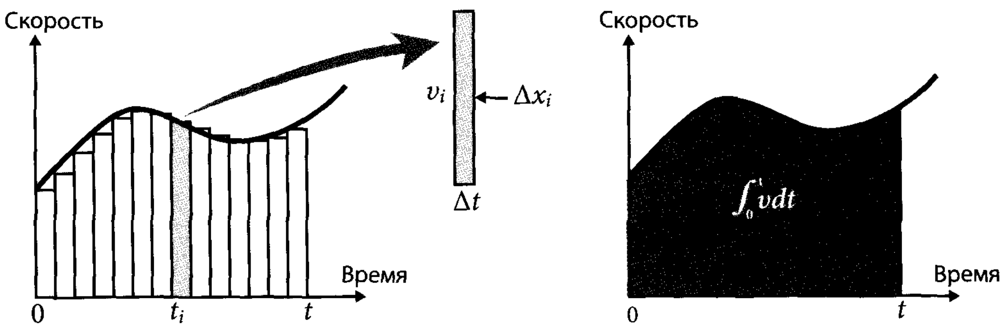
$$m\frac{dv}{dt} = F, \quad \text{или} \quad m\frac{d^2x}{d^2t} = F. \tag{9}$$

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

$$\Delta x = v\Delta t, \tag{10}$$

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, приближённо 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 момент 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:

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

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 $\Delta t \to 0$ (при этом n будет стремиться к бесконечности), то мы получим

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

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:

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

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

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

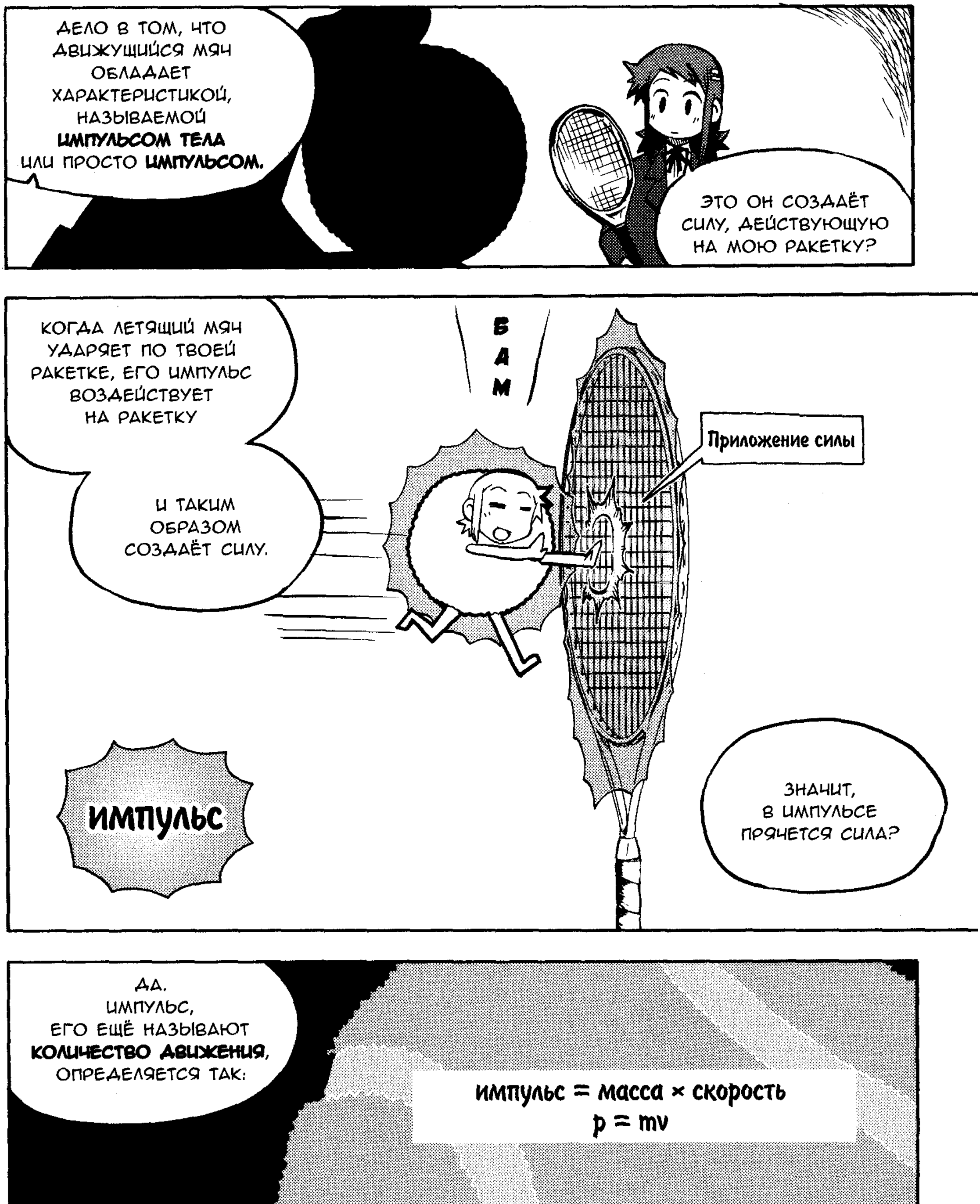
Только что мы получили уравнение, с которым, несомненно, уже знакомы!

3 ИМПУЛЬС

3.1. ИМПУЛЬС ТЕЛА И ИМПУЛЬС СИЛЫ


ЗНАЮ Я О ТВОЕЙ МАЛЕНЬКОЙ ТАЙНЕ.
ЧТО?!
КАК БЫ ТАМ НИ БЫЛО...
...ИМЕННО ПОЭТОМУ ТЫ — МОЯ СОПЕРНИЦА
НЕ ЗАБЫВАЙ О НАШЕМ ПОСЛЕДНЕМ ПОЕДИНКЕ!
ХОП!
ЧТО?.. НА ЭТОТ РАЗ ВЫИГРАЮ Я!
КАК БЫ НЕ ТАК! ПРОДОЛЖАЙ ТРЕНИРОВАТЬСЯ, ЯЙЦЕГОЛОВАЯ...
СКРИП-СКРИП-БАМ!
В ЧЁМ ДЕЛО?
НЕПО-НЯТНО!
А МОЖЕТ БЫТЬ, ОНА ИМЕЕТ В ВИДУ НАШИ ЗАНЯТИЯ С НОНОМУРОЙ?..

ПОНЯТИЕ ИМПУЛЬСА

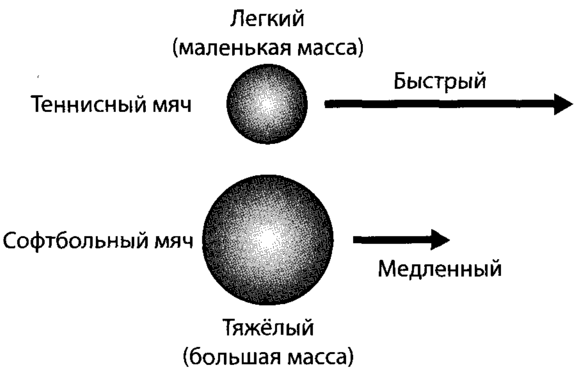


ДЕЛО В ТОМ, ЧТО ДВИЖУЩИЙСЯ МЯЧ ОБЛАДАЕТ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ, НАЗЫВАЕМОЙ **ИМПУЛЬСОМ ТЕЛА** ИЛИ ПРОСТО **ИМПУЛЬСОМ.**
ЭТО ОН СОЗДАЁТ СИЛУ, ДЕЙСТВУЮЩУЮ НА МОЮ РАКЕТКУ?
КОГДА ЛЕТЯЩИЙ МЯЧ УДАРЯЕТ ПО ТВОЕЙ РАКЕТКЕ, ЕГО ИМПУЛЬС ВОЗДЕЙСТВУЕТ НА РАКЕТКУ
И ТАКИМ ОБРАЗОМ СОЗДАЁТ СИЛУ.
БАМ
Приложение силы
ИМПУЛЬС
ЗНАЧИТ, В ИМПУЛЬСЕ ПРЯЧЕТСЯ СИЛА?
ДА. ИМПУЛЬС, ЕГО ЕЩЁ НАЗЫВАЮТ **КОЛИЧЕСТВО ДВИЖЕНИЯ**, ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ТАК:
импульс = масса × 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.
...ДА, ПОПАДАНИЕ ШАРИКОМ ДЛЯ ПИНГ-ПОНГА В ЧЬЮ-НИБУДЬ ГОЛОВУ БЫЛО БЫ НЕ ТАК БОЛЕЗНЕННО.
НУ ВОТ!
ТЫ ВСЕ ЕЩЁ В ОБИДЕ НА МЕНЯ ЗА ТОТ СЛУЧАЙ НА КОРТЕ?
Мегуми представляет: Убийство на теннисном корте: таинственный ушиб на голове жертвы
...осталось забрать её страховку.
ХИ-ХИ...
МЯЧ НЕ БЫЛ ТАКИМ УЖ БОЛЬШИМ!
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 ОБИДЧИВЫЙ.
СОВСЕМ НЕТ...
ОПЯТЬ ОНА ЗА СВОЁ...

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:

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

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

Давай обсудим!

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

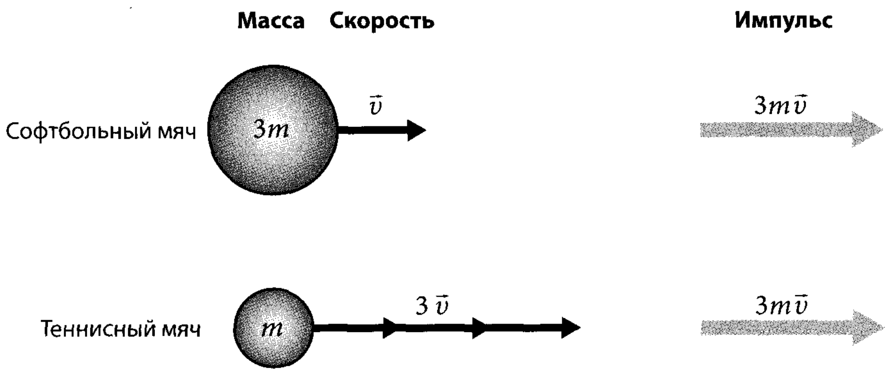
Ну, я знаю, что масса теннисного мяча около 60 г.

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.

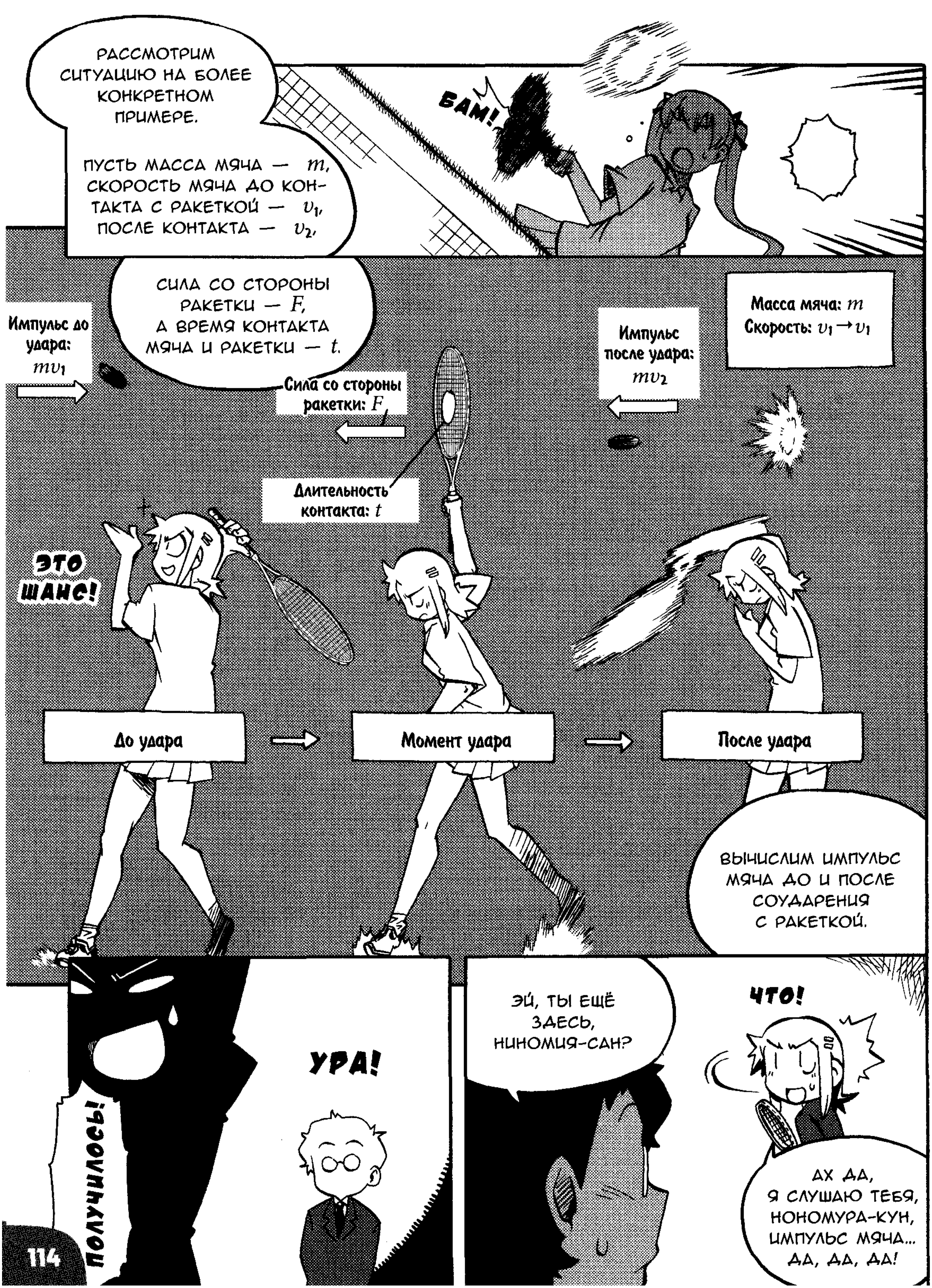
Ну, это очевидно!



ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА – ЭТО ИМПУЛЬС СИЛЫ

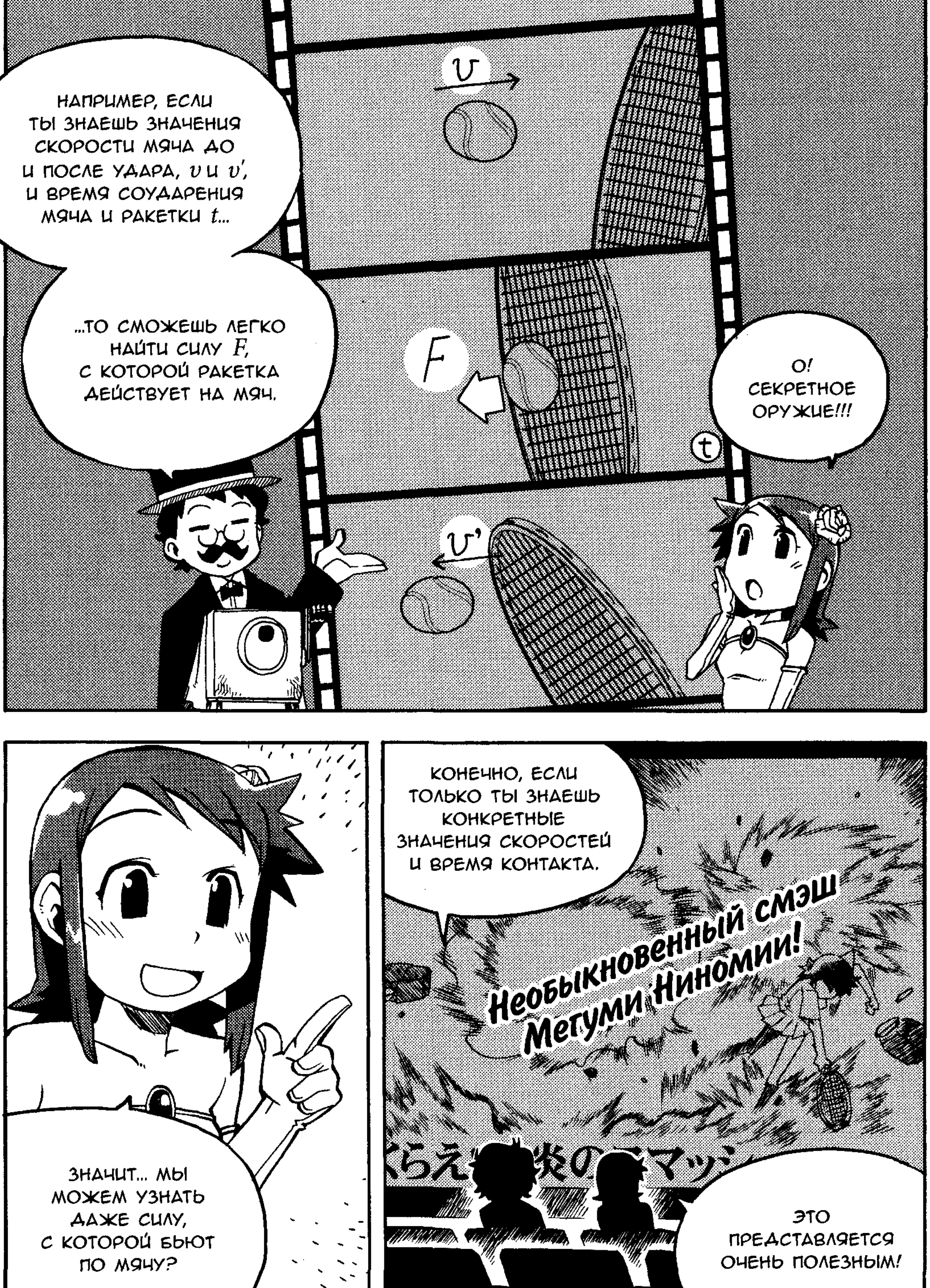
О! Я, КАЖЕТСЯ, ПОМНЮ ЕГО. ОН ВЫГЛЯДИТ ТАК:
масса × ускорение = сила
ВЕРНО, И ТЫ ЗНАЕШЬ, ЧТО УСКОРЕНИЕ — ЭТО ВСЕГО ЛИШЬ ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ВО ВРЕМЕНИ. ЗНАЧИТ...
МЕНЕНИЕ СКОРОСТИ
...ПОДСТАВИВ ВМЕСТО "УСКОРЕНИЕ" "ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ" В ЧИСЛИТЕЛЕ И "ВРЕМЯ" В ЗНАМЕНАТЕЛЕ, МЫ ПОЛУЧИМ
масса × изменение скорости / время = сила
ТАК-ТАК... И ТОГДА ОТСЮДА СЛЕДУЕТ...
КРУТЬ!
ЕСЛИ МЫ НЕМНОГО ПРЕОБРАЗУЕМ ЭТО ВЫРАЖЕНИЕ, ТО ПОЛУЧИМ СЛЕДУЮЩЕЕ:
ВИДИШЬ РАЗНИЦУ?
масса × изменение скорости = сила × время
БАМ!
И КАКОЙ В ЭТОМ СМЫСЛ?


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.
ДА, 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.
ДА, ЭТО ТАК!



РАССМОТРИМ СИТУАЦИЮ НА БОЛЕЕ КОНКРЕТНОМ ПРИМЕРЕ.
ПУСТЬ МАССА МЯЧА — m, СКОРОСТЬ МЯЧА ДО КОНТАКТА С РАКЕТКОЙ — v_1, ПОСЛЕ КОНТАКТА — v_2,
БАМ!
СИЛА СО СТОРОНЫ РАКЕТКИ — F, А ВРЕМЯ КОНТАКТА МЯЧА И РАКЕТКИ — t.
Импульс до удара: mv_1
Сила со стороны ракетки: F
Длительность контакта: t
Импульс после удара: mv_2
Масса мяча: m
Скорость: $v_1 \to v_1$
ЭТО ШАНС!
До удара
Момент удара
После удара
ВЫЧИСЛИМ ИМПУЛЬС МЯЧА ДО И ПОСЛЕ СОУДАРЕНИЯ С РАКЕТКОЙ.
ПОЛУЧИЛОСЬ!
УРА!
ЭЙ, ТЫ ЕЩЁ ЗДЕСЬ, НИНОМИЯ-САН?
ЧТО!
АХ ДА, Я СЛУШАЮ ТЕБЯ, НОНОМУРА-КУН, ИМПУЛЬС МЯЧА... ДА, ДА, ДА!


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.
ВОТ ЧТО У НАС ПОЛУЧИТСЯ...
$mv_2 - mv_1 = Ft$
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 СИЛУ ПРИ ИЗВЕСТНОМ ИЗМЕНЕНИИ ИМПУЛЬСА.


Например, если ты знаешь значения скорости мяча до и после удара, v и v', и время соударения мяча и ракетки t...
v
...то сможешь легко найти силу F, с которой ракетка действует на мяч.
F
О! Секретное оружие!!!
t
v'
Значит... мы можем узнать даже силу, с которой бьют по мячу?
Конечно, если только ты знаешь конкретные значения скоростей и время контакта.
Необыкновенный смэш Мегуми Ниномии!
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.

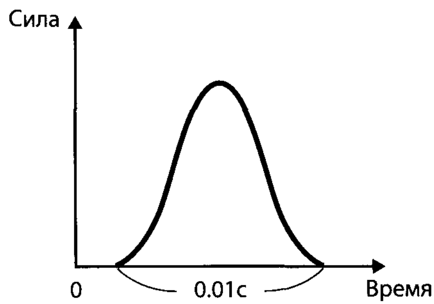
На этот раз я действительно вас снимал.

Зачем?

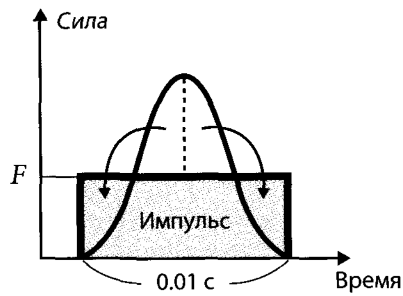
Исключительно во имя науки. Как бы то ни было, я проанализировал снимки и выяснил, что скорость мяча при ударе о ракетку была около 100 км/ч, а отбила ты его со скоростью около 80 км/ч. Также я определил время контакта мяча с твоей ракеткой — оно составило 0.01 секунды.

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.



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 кг × (-27.8) м/с = 1.7 кг·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 кг × 22.2 м/с = 1.3 кг·м/с.

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

Да.

Изменение импульса мяча =
= импульс мяча после удара — импульс до удара =
= 1.3 кг·м/с - (-1.7кг·м/с) = 3.0 кг·м/с = Δp.

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

изменение импульса мяча =
= сила, действующая на мяч × время действия силы,

мы получим

$$3.0 = F \times 0.01.$$

Понятно! Разделив 3 кг·м/с на 0.01 с, мы узнаем, какова сила удара... Значит, получится 300!

Да! Допишем сюда единицу силы — Н (ньютон).

$$F = 300 \text{ Н}.$$

Для наглядности выразим 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.

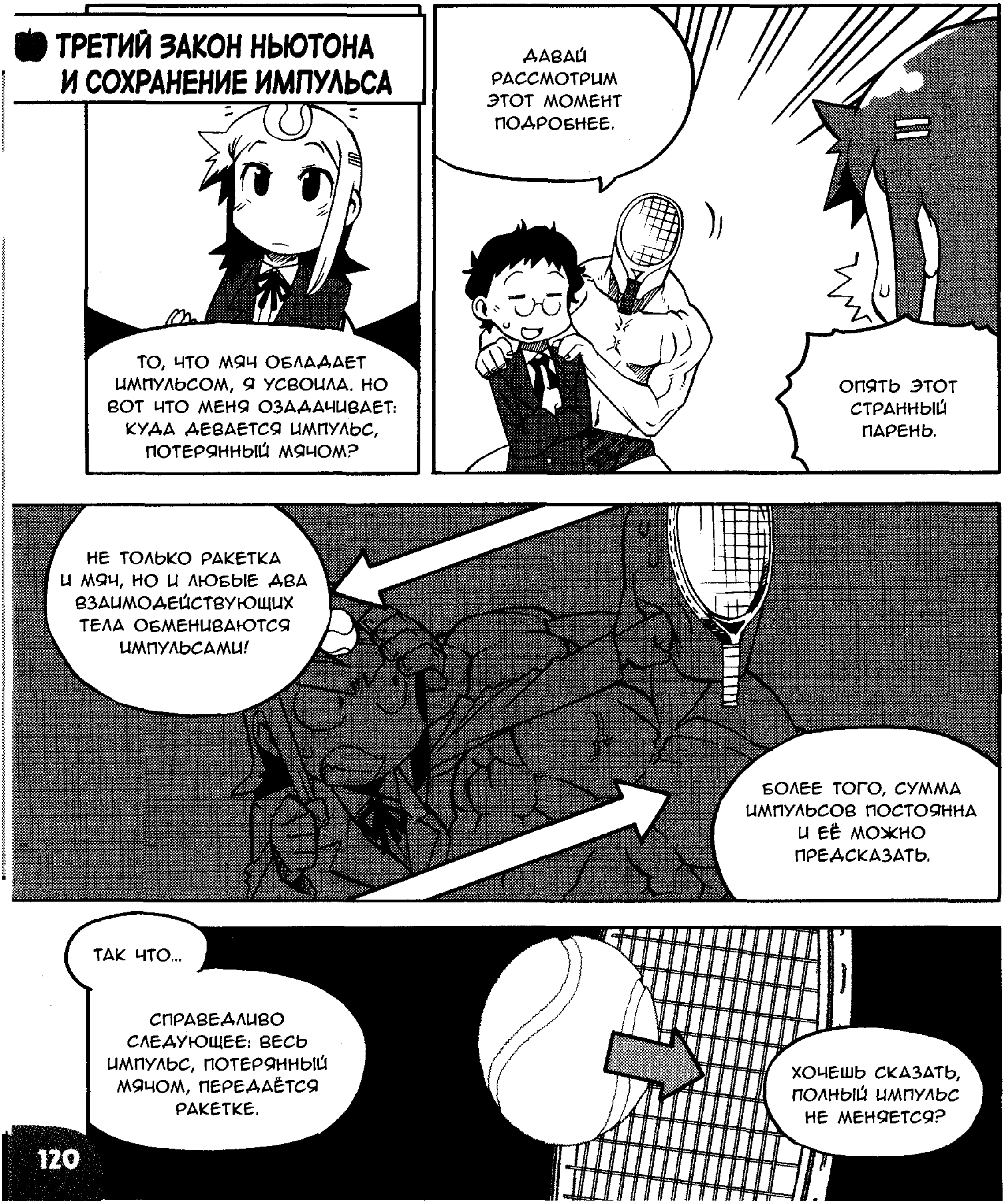
Ого! Но мне кажется, что 30 кг и поднять-то нелегко!

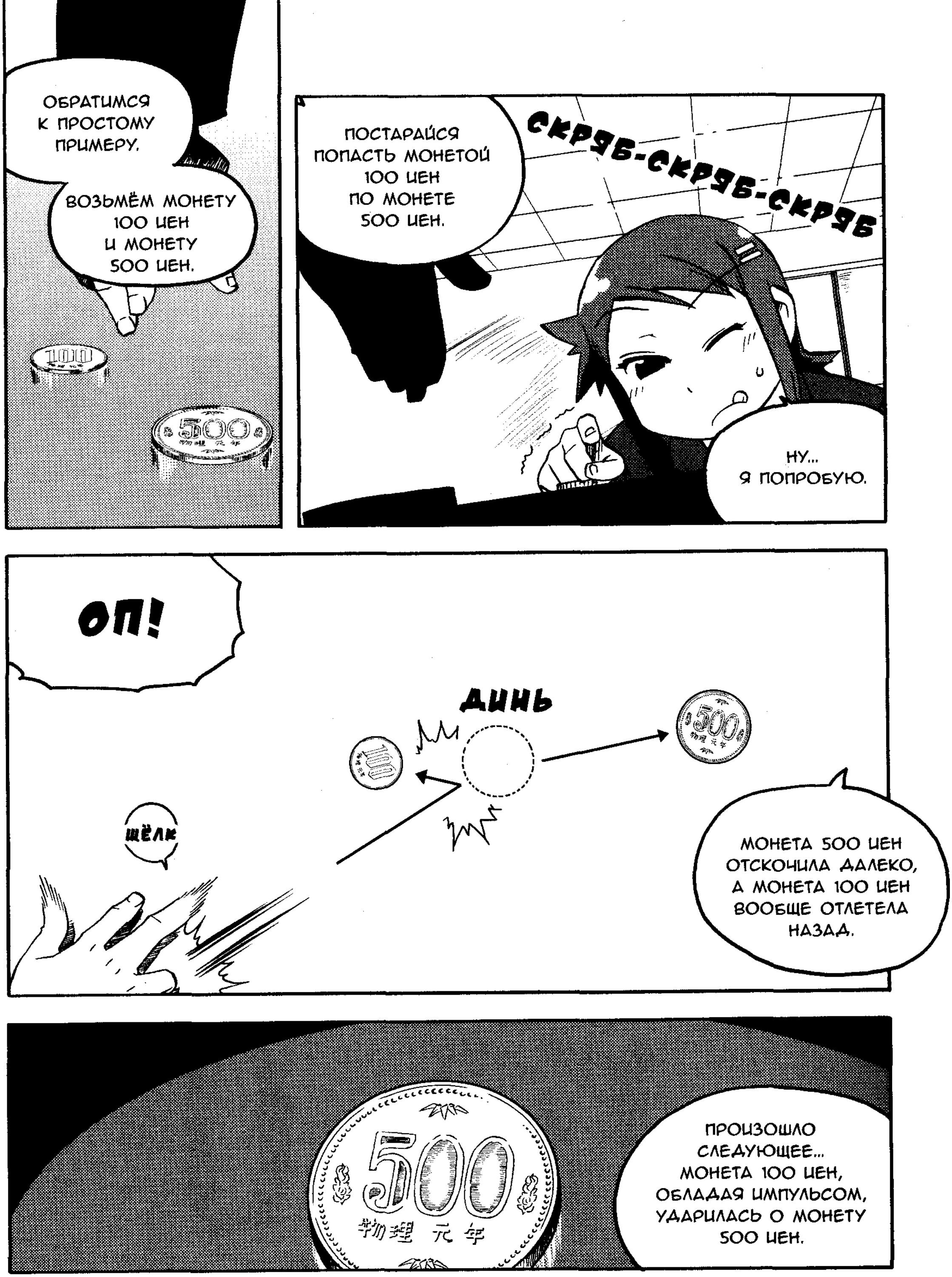
Ведь это — мгновенная сила. Мышцы используются здесь совсем по-другому, чем при поднятии груза весом 30 кг.

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

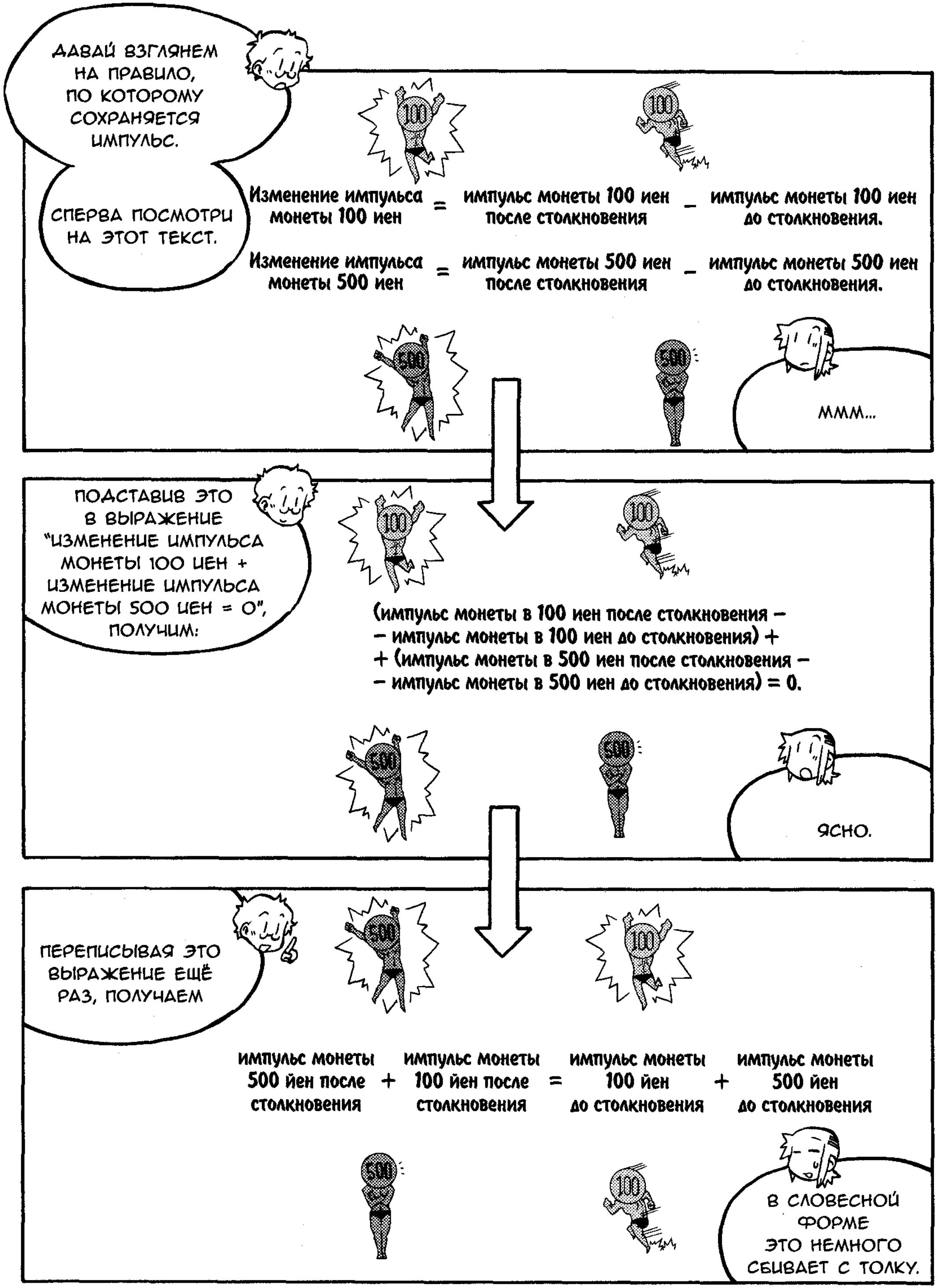
ТРЕТИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА И СОХРАНЕНИЕ ИМПУЛЬСА

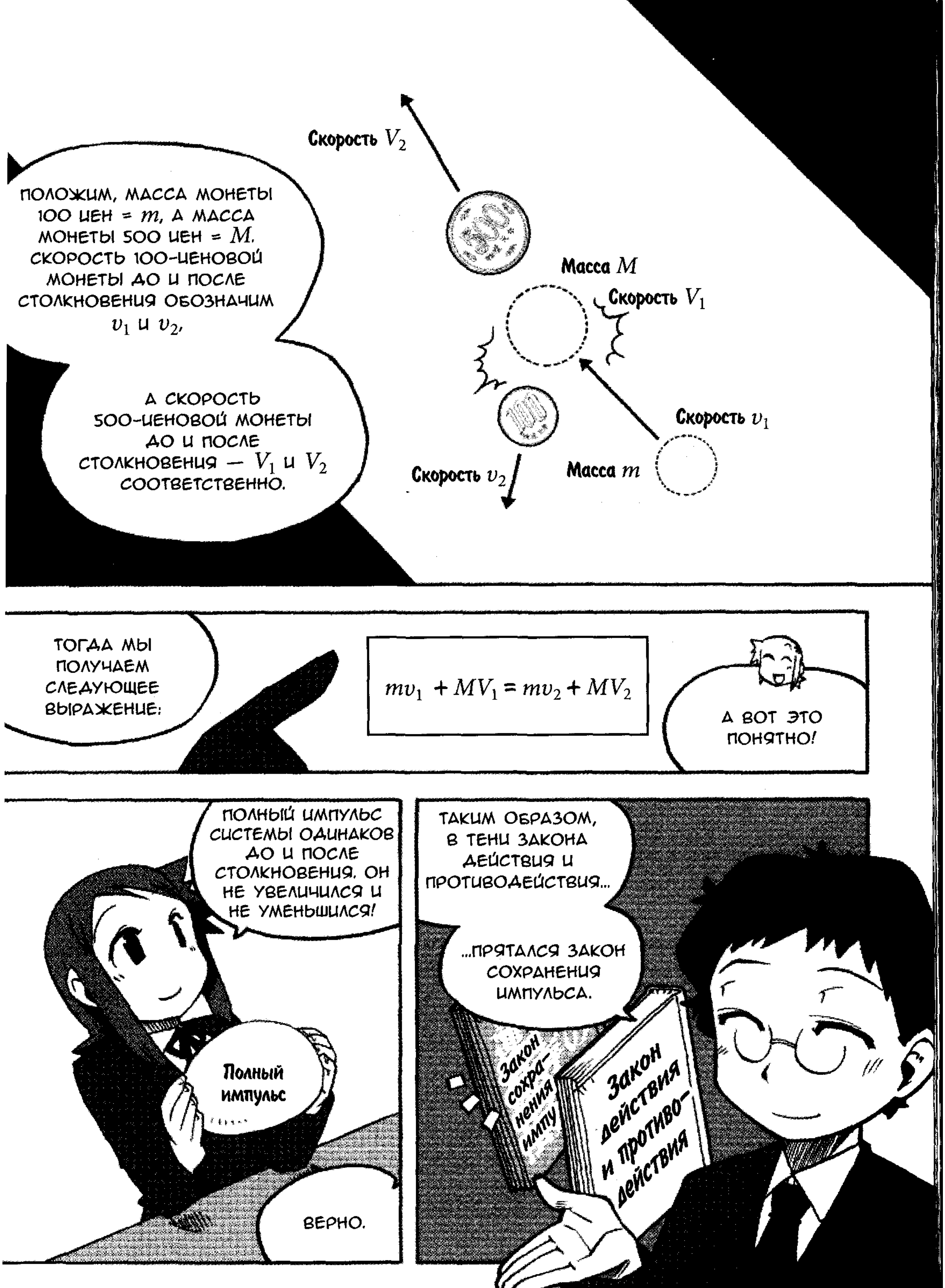



ОБРАТИМСЯ К ПРОСТОМУ ПРИМЕРУ.
ВОЗЬМЁМ МОНЕТУ 100 ИЕН И МОНЕТУ 500 ИЕН.
ПОСТАРАЙСЯ ПОПАСТЬ МОНЕТОЙ 100 ИЕН ПО МОНЕТЕ 500 ИЕН.
СКРЯБ-СКРЯБ-СКРЯБ
НУ... Я ПОПРОБУЮ.
ОП!
ЩЁЛК
ДИНЬ
МОНЕТА 500 ИЕН ОТСКОЧИЛА ДАЛЕКО, А МОНЕТА 100 ИЕН ВООБЩЕ ОТЛЕТЕЛА НАЗАД.
ПРОИЗОШЛО СЛЕДУЮЩЕЕ... МОНЕТА 100 ИЕН, ОБЛАДАЯ ИМПУЛЬСОМ, УДАРИЛАСЬ О МОНЕТУ 500 ИЕН.


Сила, действующая на 500 иен со стороны 100 иен
Сила, действующая на 100 иен со стороны 500 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.
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**".
0

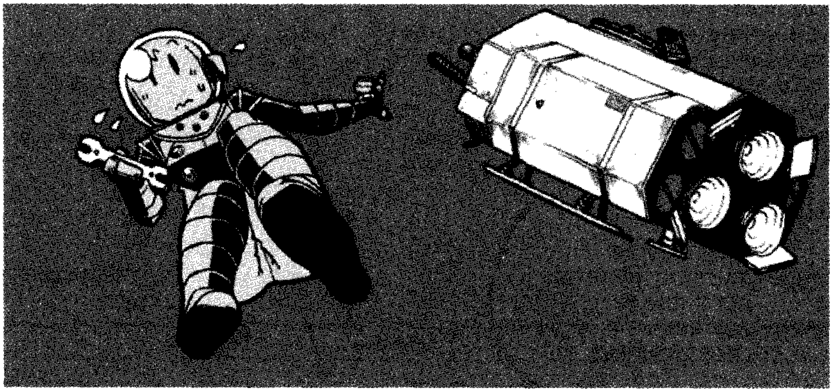

ПОКА 500-ЦЕНОВАЯ МОНЕТА ПОКОИЛАСЬ, ЕЁ ИМПУЛЬС БЫЛ РАВЕН НУЛЮ. ЗАТЕМ В НЕЁ ВРЕЗАЛАСЬ 100-ЦЕНОВАЯ МОНЕТА...
ТОП, ТОП, ТОП!
ПОКА ДЕЙСТВОВАЛИ СИЛЫ, ИМПУЛЬСЫ ОБЕИХ МОНЕТ МЕНЯЛИСЬ.
БАХ!
НЕ ОЧЕНЬ МИЛАЯ КАРТИНКА, НО ИДЕЮ Я УЛОВИЛА.
СУММА ИМПУЛЬСОВ ОБЕИХ МОНЕТ ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ РАВНА НАЧАЛЬНОМУ ИМПУЛЬСУ МОНЕТЫ 100 ИЕН.
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.


ДАВАЙ ВЗГЛЯНЕМ НА ПРАВИЛО, ПО КОТОРОМУ СОХРАНЯЕТСЯ ИМПУЛЬС.
СПЕРВА ПОСМОТРИ НА ЭТОТ ТЕКСТ.
Изменение импульса монеты 100 иен = импульс монеты 100 иен после столкновения − импульс монеты 100 иен до столкновения.
Изменение импульса монеты 500 иен = импульс монеты 500 иен после столкновения − импульс монеты 500 иен до столкновения.
100
100
500
500
МММ...
ПОДСТАВИВ ЭТО В ВЫРАЖЕНИЕ "ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА МОНЕТЫ 100 ИЕН + ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА МОНЕТЫ 500 ИЕН = 0", ПОЛУЧИМ:
(импульс монеты в 100 иен после столкновения −
− импульс монеты в 100 иен до столкновения) +
+ (импульс монеты в 500 иен после столкновения −
− импульс монеты в 500 иен до столкновения) = 0.
100
100
500
500
ЯСНО.
ПЕРЕПИСЫВАЯ ЭТО ВЫРАЖЕНИЕ ЕЩЁ РАЗ, ПОЛУЧАЕМ
500
100
импульс монеты 500 йен после столкновения + импульс монеты 100 йен после столкновения = импульс монеты 100 йен до столкновения + импульс монеты 500 йен до столкновения
500
100
В СЛОВЕСНОЙ ФОРМЕ ЭТО НЕМНОГО СБИВАЕТ С ТОЛКУ.



Скорость V_2
ПОЛОЖИМ, МАССА МОНЕТЫ 100 ЙЕН = m, А МАССА МОНЕТЫ 500 ЙЕН = M. СКОРОСТЬ 100-ЙЕНОВОЙ МОНЕТЫ ДО И ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ОБОЗНАЧИМ v_1 И v_2,
Масса M
Скорость V_1
А СКОРОСТЬ 500-ЙЕНОВОЙ МОНЕТЫ ДО И ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ — V_1 И V_2 СООТВЕТСТВЕННО.
Скорость v_1
Скорость v_2
Масса m
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 импу
Закон действия и противо-действия

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-хо-хо-хо, 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.

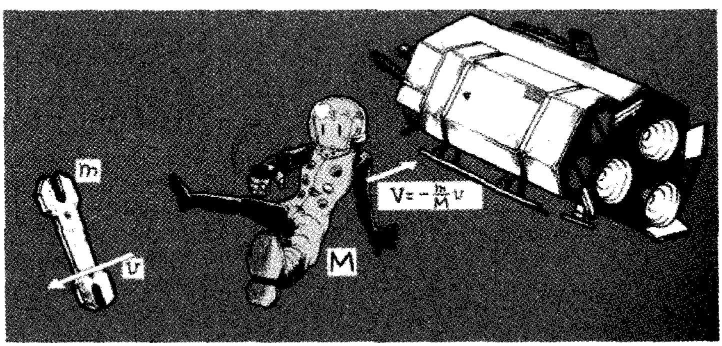
Так и есть! В соответствии с законом сохранения импульса, сумма импульсов обоих тел остаётся равной нулю даже после того, как ты бросишь гаечный ключ. Поэтому

$$mv + MV = 0.$$

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.



Давай обсудим!

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?

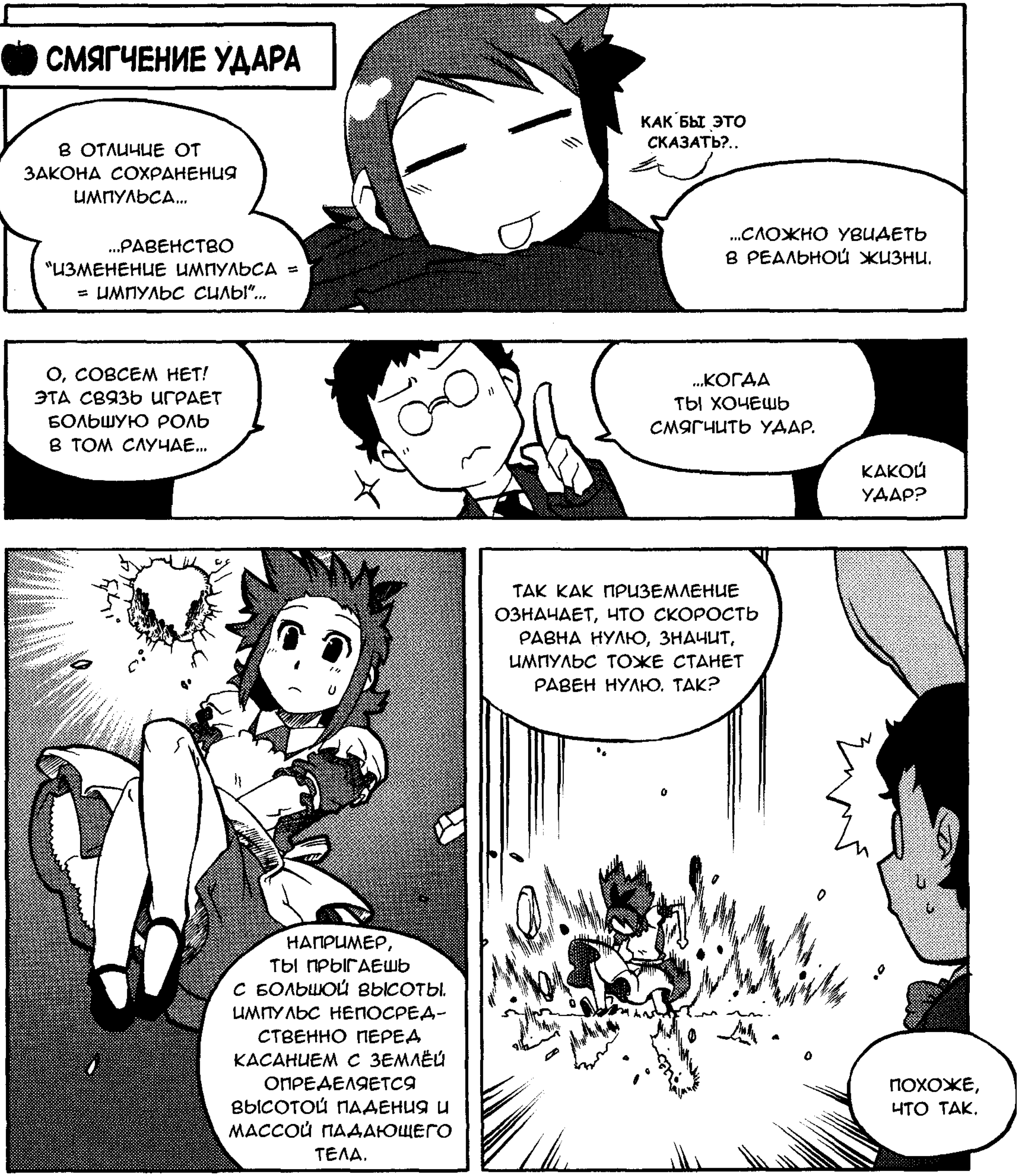
Отличная идея. Да, ты будешь двигаться всё быстрее и быстрее. Между прочим, по сути, именно так и движется ракета. Газы, выбрасываемые из её сопла, эквивалентны брошенному телу.

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

СМЯГЧЕНИЕ УДАРА



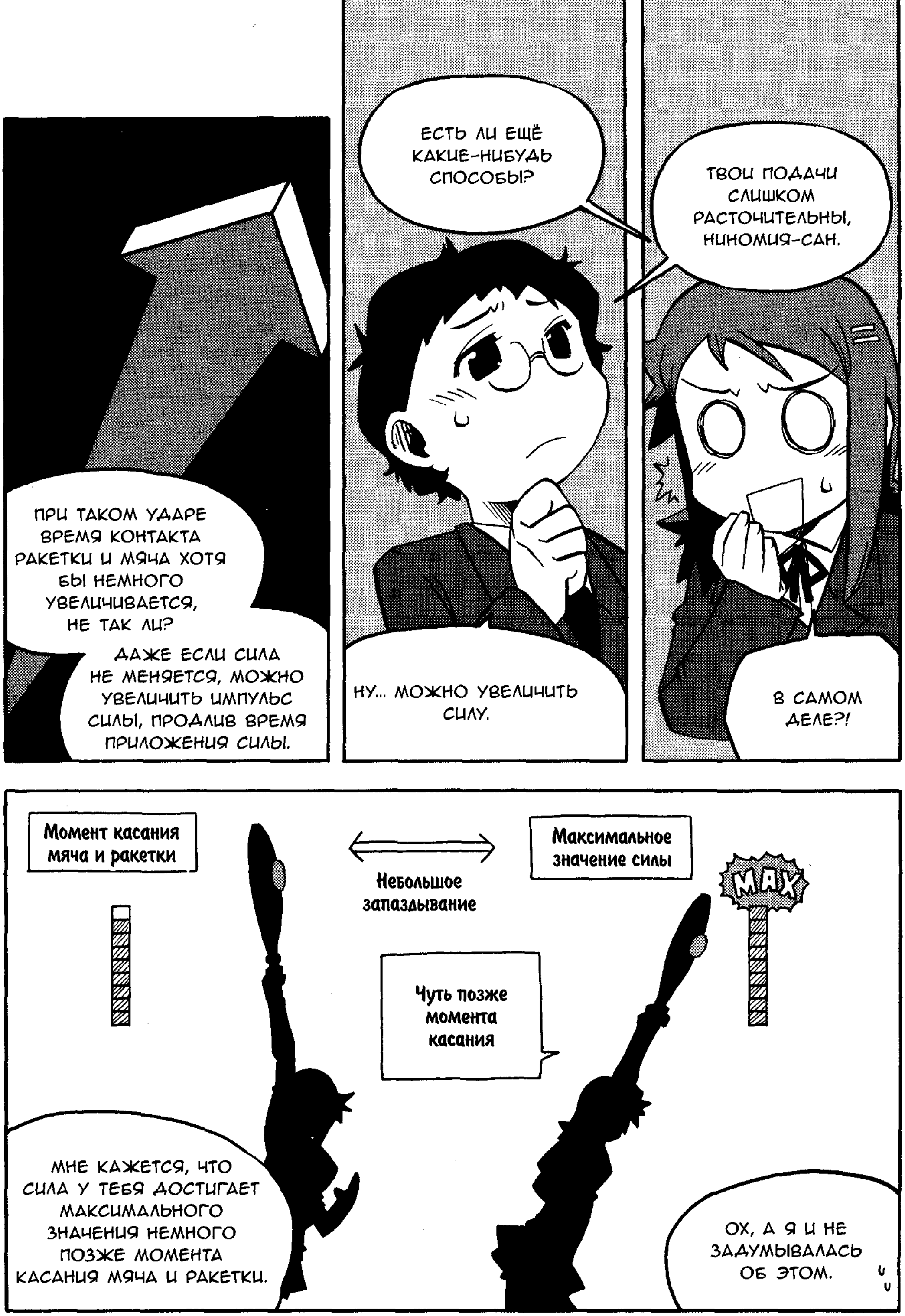

ТЫ МОЖЕШЬ ПРОДЛИТЬ КАК МОЖНО ДОЛЬШЕ ВРЕМЯ, В ТЕЧЕНИЕ КОТОРОГО НА ТЕБЯ БУДЕТ ДЕЙСТВОВАТЬ СИЛА СО СТОРОНЫ ЗЕМЛИ.
ВРЕМЯ
КАК ЭТО?
ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ФИКСИРОВАНО, ТЫ НЕ МОЖЕШЬ НА НЕГО ПОВЛИЯТЬ. ОДНАКО ТЫ МОЖЕШЬ СМЯГЧИТЬ УДАР, КОТОРЫЙ ПРИДЁТСЯ НА ТВОЁ ТЕЛО.
ИСПОЛЬЗУЯ РАВЕНСТВО "ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТЕЛА = ИМПУЛЬС СИЛЫ",
ПОЛУЧАЕМ "ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА ТЕЛА = СИЛА ДЕЙСТВИЯ СО СТОРОНЫ ЗЕМЛИ × × ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ" $m \times v = F \times t$.
ПРАВДА? И КАК ЖЕ?
ЭТО РАВЕНСТВО МОЖНО ПЕРЕПИСАТЬ ТАК: $F = mv/t$.
ОТСЮДА ВИДНО, ЧТО, ЧЕМ БОЛЬШЕ ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ, ТЕМ МЕНЬШЕ СИЛА F, ДЕЙСТВУЮЩАЯ СО СТОРОНЫ ЗЕМЛИ.
ДРУГИМИ СЛОВАМИ, УДАР МОЖНО ОСЛАБИТЬ.
ЗДОРОВО!


ТЕПЕРЬ ПРЕДСТАВЬ СЕБЕ УРОК ФИЗКУЛЬТУРЫ. ПРИ ПРЫЖКАХ В ВЫСОТУ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ МЯГКИЕ ПЕНОПЛАСТОВЫЕ МАТЫ, ЧТОБЫ СМЯГЧИТЬ ПАДЕНИЕ, ТАК ВЕДЬ?
ДА, БЕЗ НИХ ПРЫГАТЬ СТРАШНОВАТО.
ОБЫЧНО МЫ ДУМАЕМ, ЧТО МАТЫ ПОГЛОЩАЮТ УДАР, ПОТОМУ ЧТО ОНИ "МЯГКИЕ И ПУШИСТЫЕ".
БУХ!
НО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ ОНИ ПРОДЛЕВАЮТ ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ.
ПОЛУЧАЕТСЯ, ЧТО ФИЗИКА И ЗДЕСЬ РАБОТАЕТ!

ДОПУСТИМ, ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ ТОРМОЗЯЩЕЙ СИЛЫ УВЕЛИЧИЛОСЬ ОТ 0.1 ДО 1 СЕКУНДЫ БЛАГОДАРЯ ПОДЛОЖЕННОМУ МАТУ.
МЕГУ, НОВЫЙ РЕКОРД!
НО ИЗ-ЗА ЭТОГО НЕБОЛЬШОГО ИЗМЕНЕНИЯ НОВАЯ СИЛА СОСТАВЛЯЕТ ЛИШЬ ОДНУ ДЕСЯТУЮ ЧАСТЬ ОТ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ.
КОШКА МОЖЕТ БЕЗБОЛЕЗНЕННО ПРИЗЕМЛИТЬСЯ, СПРЫГНУВ С БОЛЬШОЙ ВЫСОТЫ. ВОЗМОЖНО, ЕЁ ГИБКОЕ ТЕЛО ПОМОГАЕТ ЕЙ ПРОДЛИТЬ ВРЕМЯ УДАРА.
ВСЁ ВЕРНО. ИЗ-ЗА ТОГО, ЧТО КОШКА СГИБАЕТ ЛАПЫ, ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ НА ЕЁ ТЕЛО НЕМНОГО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ. НО ЭТО ПРИВОДИТ К ТОМУ, ЧТО СИЛА УДАРА О ЗЕМЛЮ ДОВОЛЬНО ЗАМЕТНО УМЕНЬШАЕТСЯ.
ДА, ЕСЛИ ДУМАТЬ ТАК, ТО МЕХАНИКА...
МЯУ
...ИМЕЕТ ОТНОШЕНИЕ К САМЫМ РАЗНООБРАЗНЫМ ОБЛАСТЯМ ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ.


АГА!
КАК УСИЛИТЬ ПОДАЧУ!
ЭТА СВЯЗЬ МЕЖДУ ИЗМЕНЕНИЕМ ИМПУЛЬСА И ИМПУЛЬСОМ СИЛЫ... МОЖЕТ БЫТЬ, ЕЁ МОЖНО ИСПОЛЬЗОВАТЬ И ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ СИЛЫ?
КОНЕЧНО МОЖНО!
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 РАСПЛЮЩИТЬ СЛОНА!
КИ-Я-Я!
НУ, ЭТО УЖЕ СЛИШКОМ!
ОГО-ГО!
ゴオオ
ХЕ-ХЕ!

СУДЯ ПО ПОСЛЕДНЕМУ МАТЧУ, ФИЗИЧЕСКИЕ СИЛЫ У ВАС С САЯКОЙ ПРИМЕРНО РАВНЫ.
НО У МЕНЯ СЛОЖИЛОСЬ ВПЕЧАТЛЕНИЕ, ЧТО КОДА-САН ПРИ ПОДАЧЕ БЬЁТ ПО МЯЧУ, ИСПОЛЬЗУЯ СВОЁ ТЕЛО КАК ПРУЖИНУ.
ТЫ ХОЧЕШЬ СКАЗАТЬ, ЧТО Я ИГРАЮ ХУЖЕ САЯКИ?
ДЁРГ!
ФУ-У-У!
ОЙ!
Я ПРОСТО ГОВОРЮ, ЧТО ЗДЕСЬ ЕСТЬ НАД ЧЕМ ПОРАБОТАТЬ. УФ!
ХОРОШО, ТОГДА Я БУДУ ОЦЕНИВАТЬ СВОЮ ПОДАЧУ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕХАНИКИ.
ЗВУЧИТ НЕПЛОХО.
ОХ-ОХ-ОХ!
МЫ ЗНАЕМ, ЧТО ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА РАВНО СИЛЕ, УМНОЖЕННОЙ НА ВРЕМЯ, А ЗНАЧИТ, ЭТО ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ ТВОЕЙ ПОДАЧИ...
Я СОВЕТУЮ ПРИ УДАРЕ КАК МОЖНО ДОЛЬШЕ ВОЗДЕЙСТВОВАТЬ НА МЯЧ.
НА ЧТО Я ТРАЧУ ВРЕМЯ?!
ДА, ЧАСТО ГОВОРЯТ, ЧТО, КОГДА МЯЧ КАСАЕТСЯ РАКЕТКИ, НАДО БИТЬ ПО НЕМУ ТАК, БУДТО ХОЧЕШЬ ЕГО РАЗДАВИТЬ!


Есть ли ещё какие-нибудь способы?
Твои подачи слишком расточительны, Ниномия-сан.
При таком ударе время контакта ракетки и мяча хотя бы немного увеличивается, не так ли?
Даже если сила не меняется, можно увеличить импульс силы, продлив время приложения силы.
Ну... можно увеличить силу.
В самом деле?!
Момент касания мяча и ракетки
Небольшое запаздывание
Максимальное значение силы
MAX
Чуть позже момента касания
Мне кажется, что сила у тебя достигает максимального значения немного позже момента касания мяча и ракетки.
Ох, а я и не задумывалась об этом.


ПОЭТОМУ ТЕБЕ, НАВЕРНОЕ, СТОИТ, ИСПОЛЬЗУЯ ГИБКОСТЬ СВОЕГО ТЕЛА, ДОБИТЬСЯ ТОГО, ЧТОБЫ СИЛА В МОМЕНТ КАСАНИЯ БЫЛА МАКСИМАЛЬНОЙ.
ДА-А, ГИБКОСТЬ — ЭТО ХОРОШО!
ЗНАЧИТ, МАЛЕНЬКАЯ ЗАДЕРЖКА МОЖЕТ ДАТЬ БОЛЬШОЙ ЭФФЕКТ?!
ЧТОБЫ ПРОДЛИТЬ ВРЕМЯ ДЕЙСТВИЯ СИЛЫ НА МЯЧ, НАДО БИТЬ ПО НЕМУ, КАК БУДТО ХОЧЕШЬ ЕГО РАЗДАВИТЬ!
ТОГДА ИМПУЛЬС УВЕЛИЧИВАЕТСЯ!
ГИБКОСТЬ
КОНЕЧНО, ТЕННИС — СЛОЖНАЯ ИГРА, И НЕ ВСЁ МОЖНО ТАК ПРОСТО ОПИСАТЬ...
ОДНАКО МЯЧ ОТЛЕТАЕТ ОТ РАКЕТКИ ПО ПРИНЦИПУ "ИЗМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСА = = ИМПУЛЬС СИЛЫ". ЭТО ТОЖЕ ФАКТ!
ФЮИТЬ!
ДА.
НУ, ВО ВРЕМЯ ИГРЫ НАДО ЕЩЁ СОСРЕДОТОЧИТЬСЯ НА МЯЧЕ.


ХОТЯ Я И ПОНИМАЮ ПРИНЦИПЫ, НЕ ДУМАЮ, ЧТО ЛИЧНО МНЕ ХВАТИТ КООРДИНАЦИИ СДЕЛАТЬ ЭТО. НО, ПОЛАГАЮ, ТЫ СМОЖЕШЬ, НИНОМИЯ-САН...
СПАСИБО! ПРИЯТНО ЭТО СЛЫШАТЬ ОТ ТЕБЯ, РИОТА!
ЖИМ-М
РИ... ЧТО? ТЫ... С ЧЕГО ЭТО ТЫ ВДРУГ?
ТЫ ОПЯТЬ ЧТО-ТО ЗАДУМАЛА!..
ПЯТИТСЯ
НЕТ, НЕТ, СОВСЕМ НЕТ!
НЕ ДУМАЕШЬ ЛИ ТЫ, ЧТО НАМ ПОРА УЖЕ НАЗЫВАТЬ ДРУГ ДРУГА ПО ИМЕНАМ?
ЗНАЕШЬ, ТЫ МОЖЕШЬ ЗВАТЬ МЕНЯ МЕГУМИ.
ДЛЯ МЕНЯ ЭТО УЖ СЛИШКОМ.
НУ ЖЕ! НЕ БУДЬ ТАКИМ ЗАНУДОЙ!


МОЖЕШЬ ТОГДА НАЗЫВАТЬ МЕНЯ ПРОСТО МЕГУ. ЭТО МОЁ ПРОЗВИЩЕ, ХОРОШО?
ПОНЯТНО, РИОТА? ВСЁ, РЕШЕНО!
М-М-М...
В ОБЩЕМ...
КХМ
...В СЛЕДУЮЩИЙ РАЗ МЫ ЗАКОНЧИМ С ОСНОВАМИ МЕХАНИКИ.
НАДЕЮСЬ, ТЫ ПРОДЕРЖИШЬСЯ!
ОБЯЗА-ТЕЛЬНО!
...ЗНАЧИТ, СЛЕДУЮЩИЙ УРОК БУДЕТ ПОСЛЕДНИМ?
ДА.

ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!

ИМПУЛЬС ТЕЛА И ИМПУЛЬС СИЛЫ

Импульс тела, обычно называемый просто импульс, 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:

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

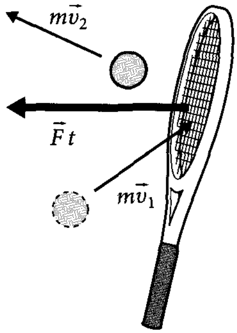
Умножив левую и правую части уравнения на t, получим

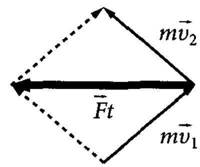
$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = \vec{F}t.$$

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.





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

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:

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

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:

$$mv = Ft.$$

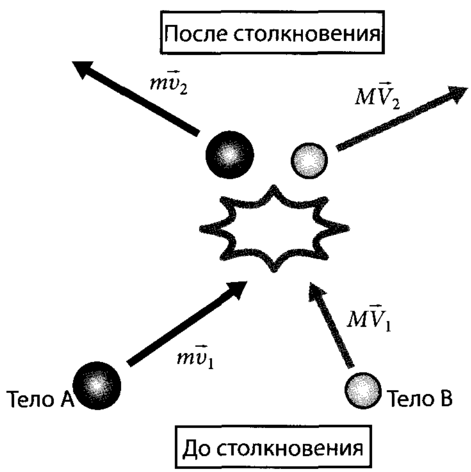
С увеличением t даже при одних и тех же значениях mv значение F уменьшается. Например, маты, используемые при прыжках в высоту (стр. 131), служат для того, чтобы растянуть интервал времени между началом столкновения тела с матом и моментом, когда импульс mv станет равным нулю. Пока тело погружается в 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 A и B сталкиваются друг с другом без воздействия какой-либо внешней силы, как показано на рисунке выше.

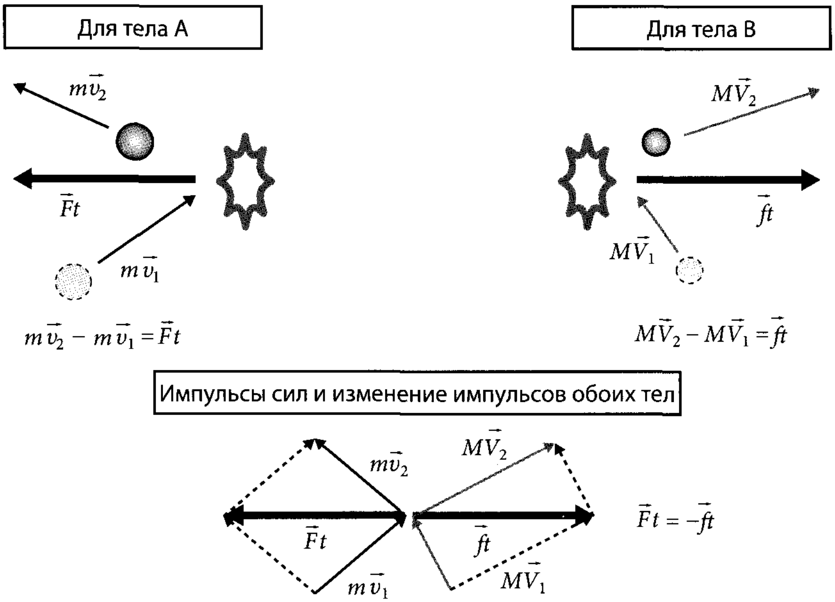
Для начала рассмотрим тело A (слева на рисунке). Положим, его масса равна m, а скорость до и после столкновения равна $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$ соответственно. Силу, действующую на тело A со стороны тела B, обозначим $\vec{F}$. Тогда равенство импульса силы и изменения импульса запишется так:

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

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

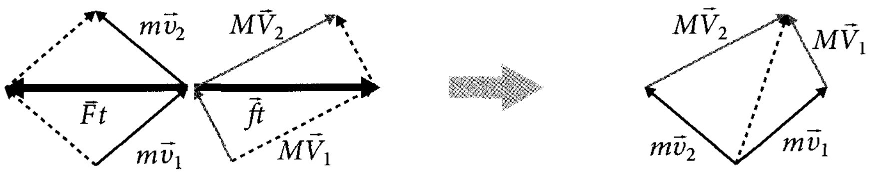
$$M\vec{V}_2 - M\vec{V}_1 = -(m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1)$$

или

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

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.



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

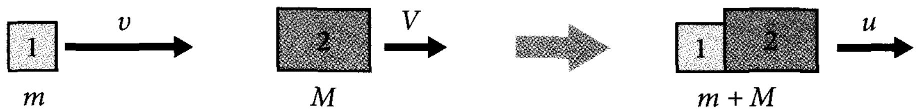
Если выразить вышеизложенное с помощью векторной схемы, то окажется, что сначала, как показано в левой части рисунка, выражения «изменение импульса = импульс силы» для обоих тел связывают друг с другом с помощью закона действия и противодействия, а затем, как показано в правой части рисунка, векторы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

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

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

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 × скорость» ясно, что

единица импульса = единица массы × единица скорости =
= (кг) × (м/с) = (кг·м/с).

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,

единица импульса = единица импульса силы =
= единица силы × единица времени = (Н) × (с) = (Н·с).

Кажется, что мы получили единицу, отличающуюся от первой, (кг·м/с). Но с учётом того, что (Н) = (кг·м/с^2), получаем

(кг·м/с^2) × (с) = (кг·м/с).

Обе единицы измерения тождественны. Итак, теперь мы знаем, что единица импульса — это (кг·м/с), или (Н·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, $\vec{F}_{1\to2}$, а силу, с которой тело 2 действует на тело 1, $\vec{F}_{2\to1}$, и запишем уравнение движения для каждого тела:

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

Подставим полученные равенства в выражение для закона действия и противодействия:

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

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

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 покоившимся 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:

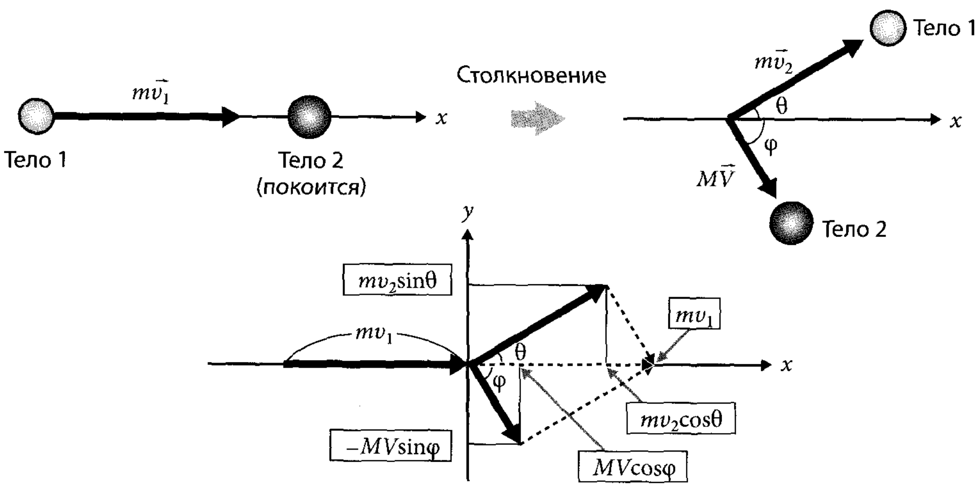
$$\vec{v}_1 = (v_1, 0), \quad \vec{v}_2 = (v_2\cos\theta, v_2\sin\theta), \quad \vec{V} = (V\cos\varphi, -V\sin\varphi).$$

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

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

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

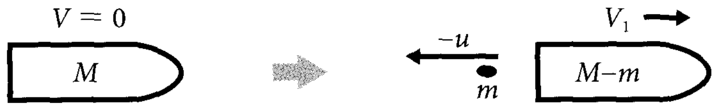
Когда монета 100 иен сталкивается с монетой 500 иен, она часто отскакивает назад. В этом случае $\theta > 90°$ и $\cos\theta < 0$. На рисунке внизу показан пример, в котором $\theta < 90°$.



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:

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

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:

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

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

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

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

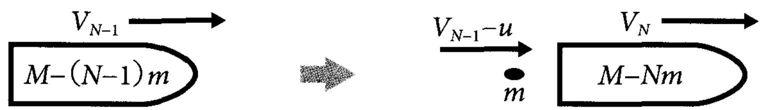
Пусть ракета продолжила выбрасывать небольшие тела массой m с относительной скоростью «минус» u.

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

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

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 $V(t)$:

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

В пределе при бесконечном уменьшении интервалов Δt ($\Delta t \to 0$) 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

$$V(t) = u\int_0^t \frac{1}{M-(dm/dt)t}\left(\frac{dm}{dt}\right)dt = u\int_0^t \frac{1}{M(dm/dt)^{-1}-t}\,dt. \qquad (6)$$

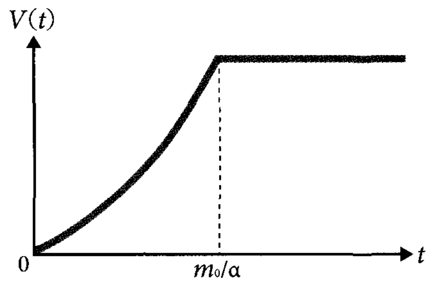
Если выброс топлива в единицу времени — постоянная величина, то, приняв

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

можно проинтегрировать уравнение (6) следующим образом:

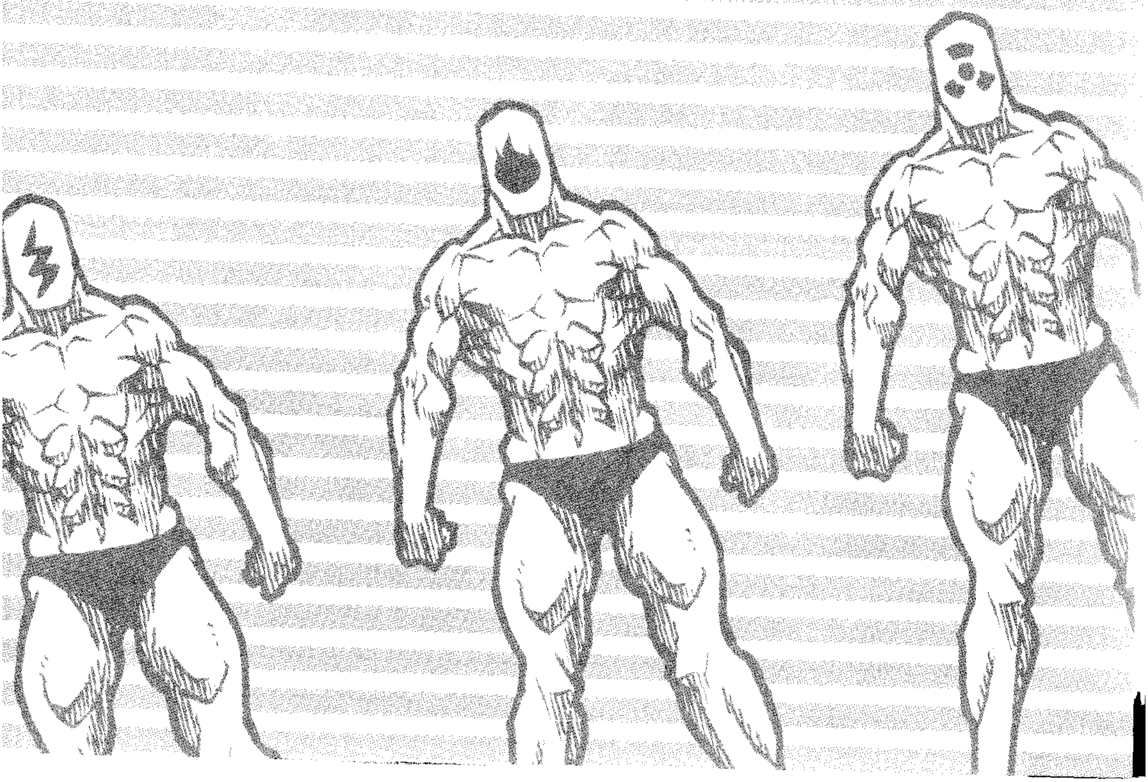
$$V(t) = u\int_0^t \frac{1}{(M/\alpha) - t}\,dt = u\left[-\ln\left(\frac{M}{\alpha} - t\right)\right]_0^t = \\ = u\ln\left(\frac{M}{M - \alpha t}\right). \qquad (7)$$

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).



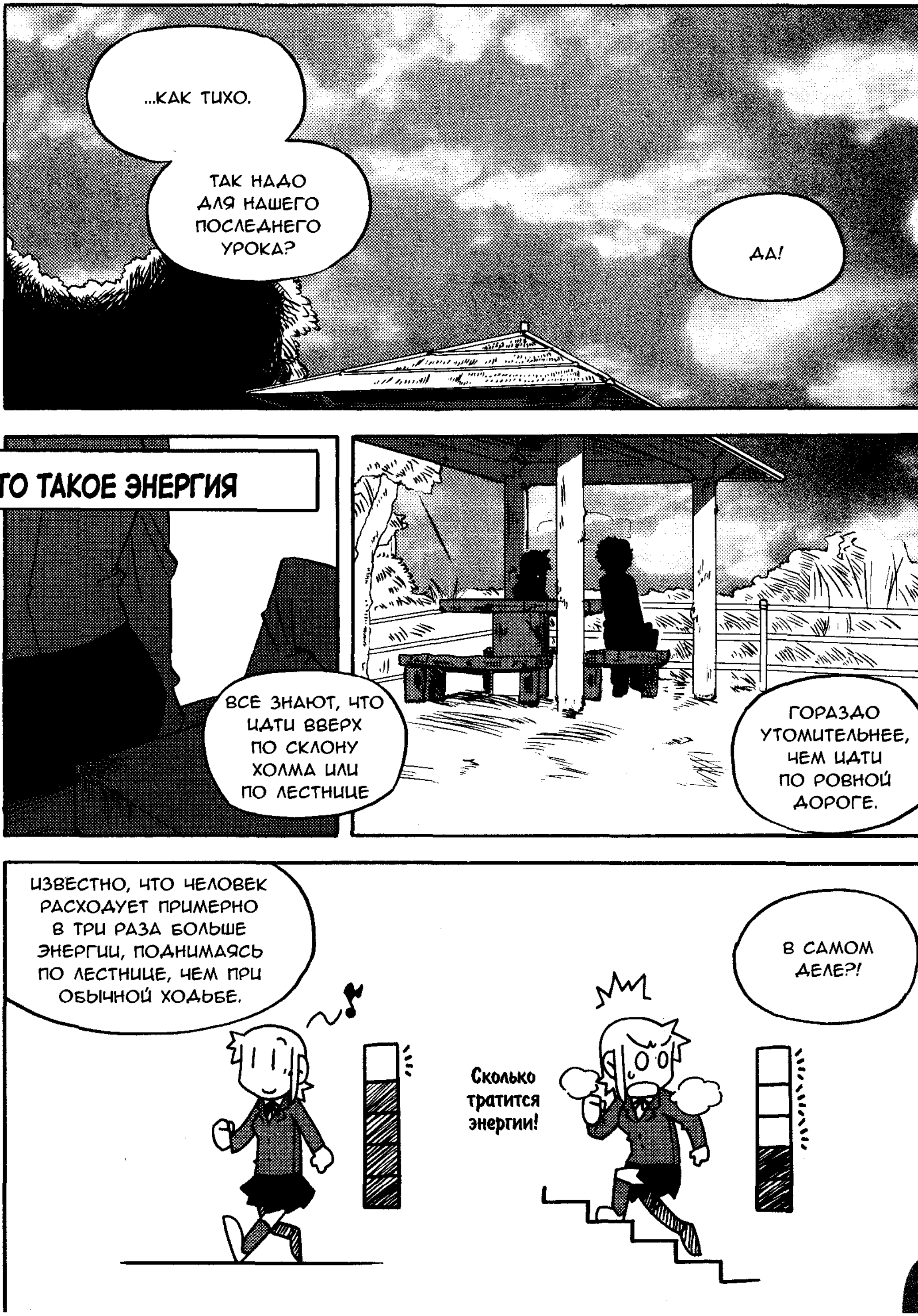
4

ЭНЕРГИЯ



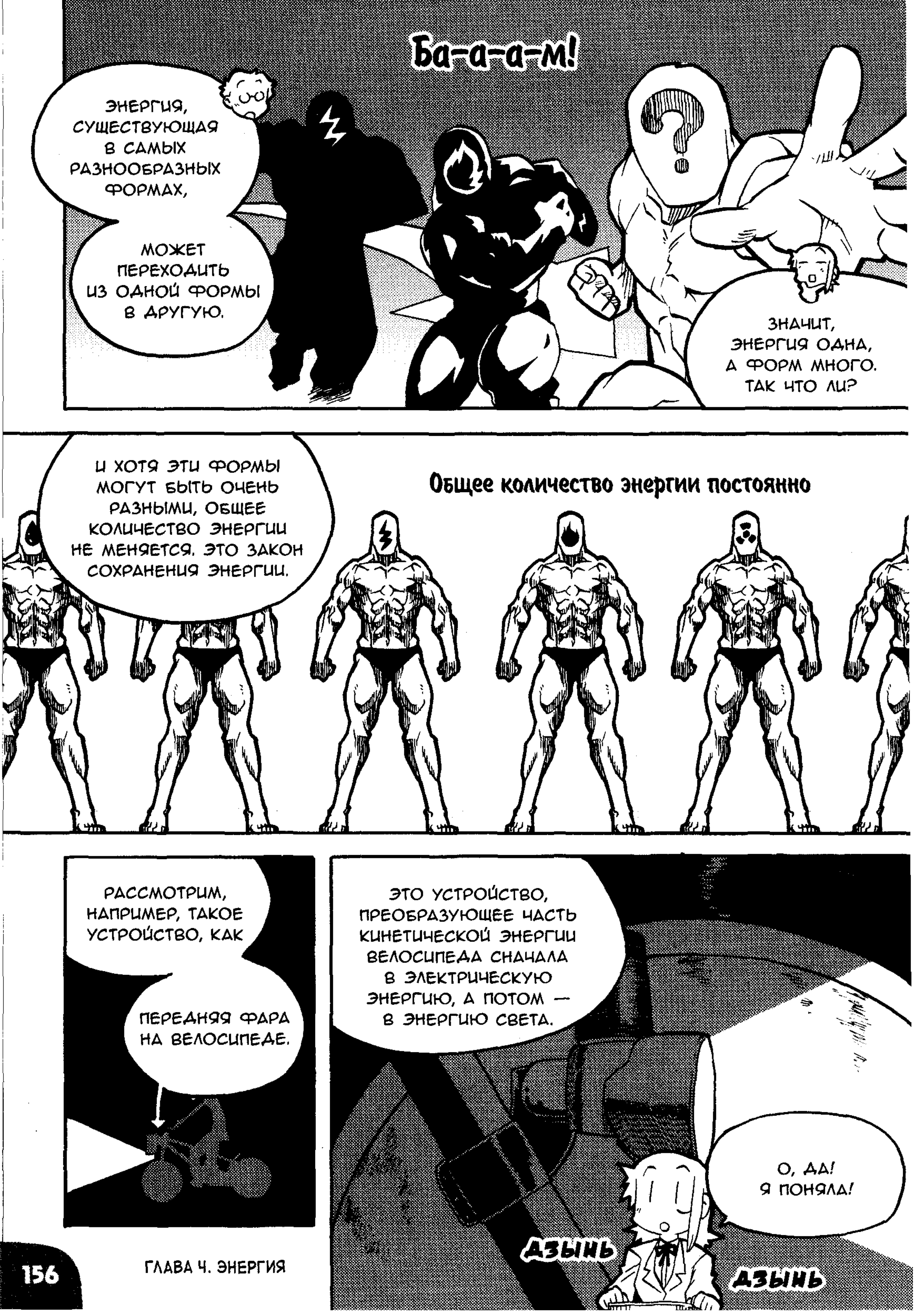
4.1. РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

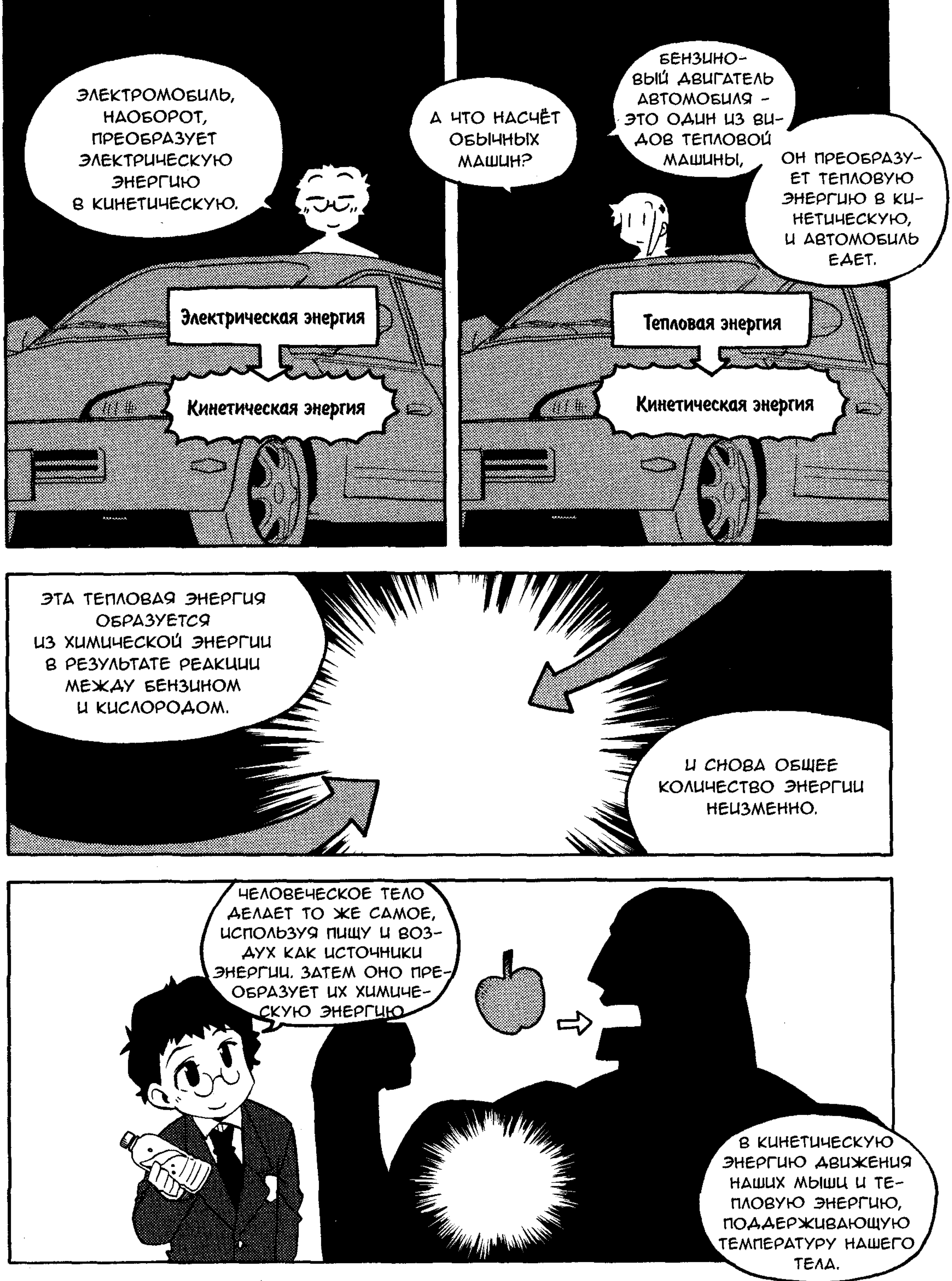
ЧТО ТАКОЕ ЭНЕРГИЯ

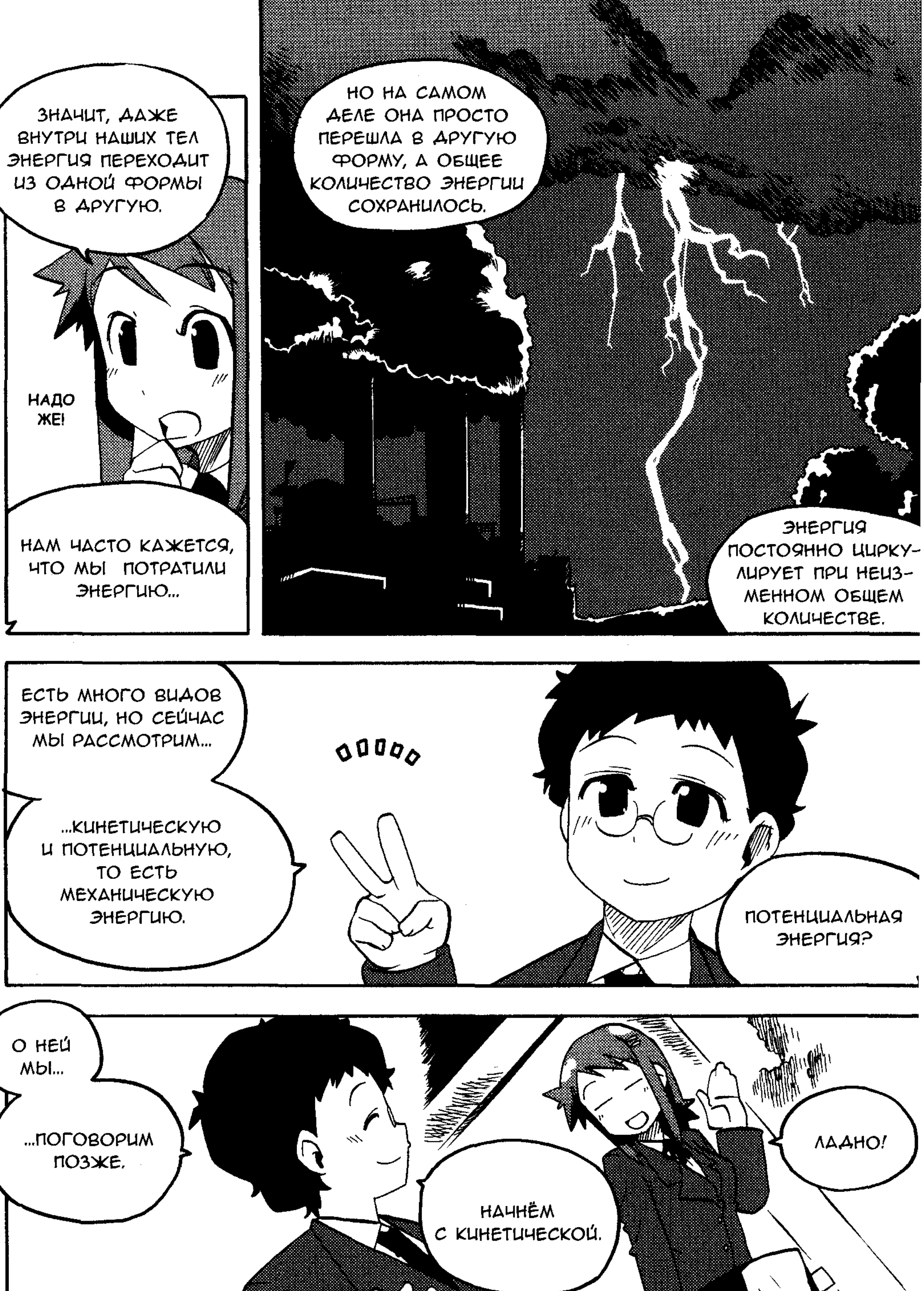



С ТЕРМИНОМ "**ЭНЕРГИЯ**" МЫ ВСТРЕЧАЕМСЯ ПОВСЮДУ, НЕ ТАК ЛИ?
ДА! НАПРИМЕР, ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АВТОМОБИЛИ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ НАПИТКИ...
ОДНАКО СЛОВО "ЭНЕРГИЯ", КАК И СЛОВО "СИЛА", ЛЮДИ ИСПОЛЬЗУЮТ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ В ЗНАЧЕНИИ, ОТЛИЧНОМ ОТ ЕГО СМЫСЛА В ФИЗИКЕ.
ПОДОЖДИ! ТЫ ХОЧЕШЬ СКАЗАТЬ...
ЧТО В ФИЗИКЕ ДЛЯ ЭНЕРГИИ ТОЖЕ ЕСТЬ КОНКРЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ?
ДА.
КАК И СИЛА, ОПРЕДЕЛЯЕМАЯ ЧЕРЕЗ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ,
ЭНЕРГИЯ В ФИЗИКЕ ТОЖЕ ИМЕЕТ ТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ.

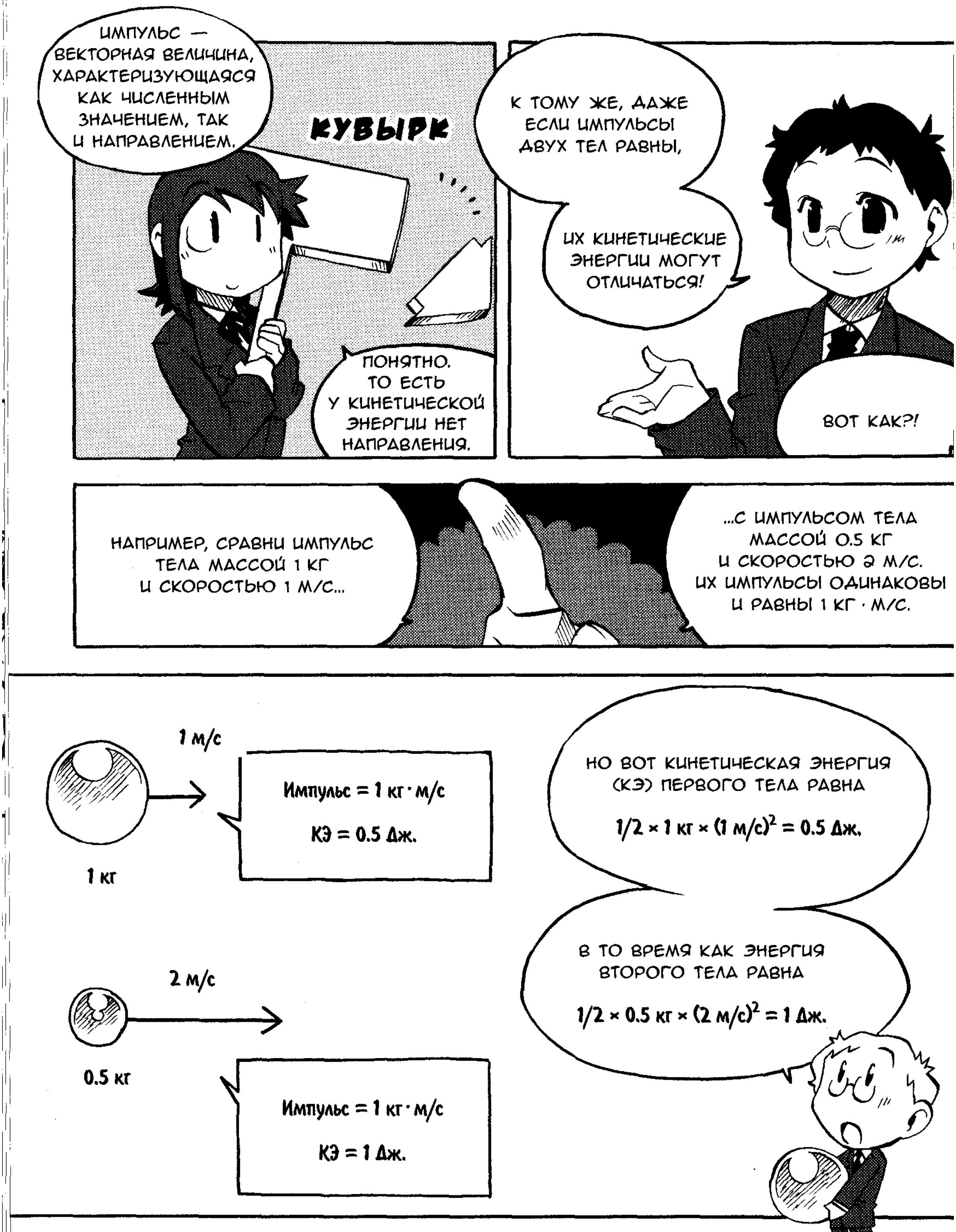

ГЛОТЬ-ГЛОТЬ
ФЫРК
КАЖЕТСЯ, ПРИПОМИНАЮ, Я РАНЬШЕ УЖЕ СЛЫШАЛА ТЕРМИНЫ "КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ" И "ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ"
ДВИЖУЩЕЕСЯ ТЕЛО ОБЛАДАЕТ ЭНЕРГИЕЙ, КОТОРУЮ НАЗЫВАЮТ КИНЕТИЧЕСКОЙ. ОНА ХАРАКТЕРИЗУЕТ ИНТЕНСИВНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ.
ПОХОЖЕ НА ИМПУЛЬС. НО ВЕДЬ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ — ЭТО ЧТО-ТО ДРУГОЕ, ДА?
УГОЩАЙСЯ!
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.
ТЫСК
ТЕБЕ НЕ НРАВИТСЯ?
НО С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ФИЗИКИ ЭТО ОДНА И ТА ЖЕ ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА.

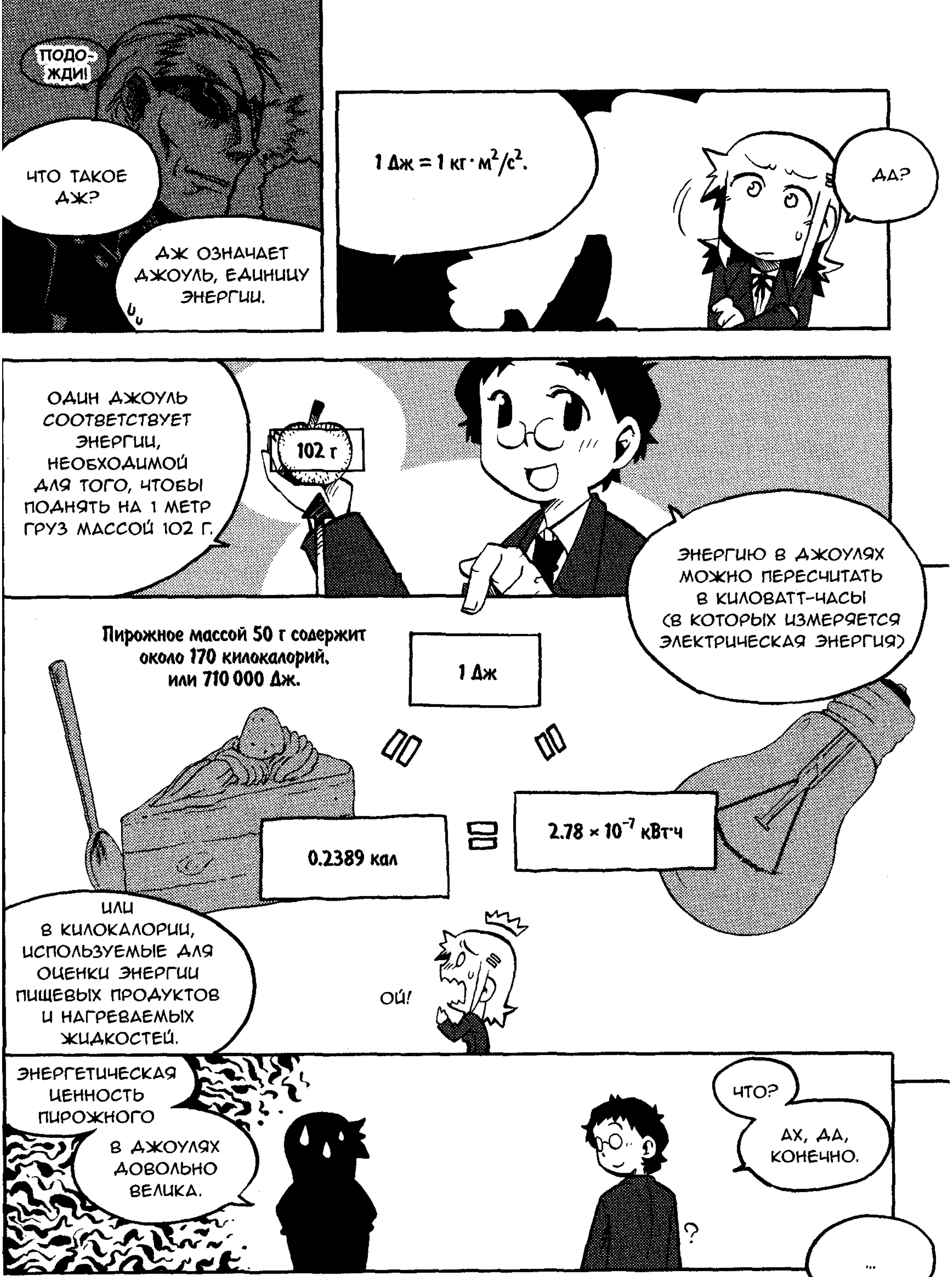

Ба-а-а-м!
ЭНЕРГИЯ, СУЩЕСТВУЮЩАЯ В САМЫХ РАЗНООБРАЗНЫХ ФОРМАХ,
МОЖЕТ ПЕРЕХОДИТЬ ИЗ ОДНОЙ ФОРМЫ В ДРУГУЮ.
ЗНАЧИТ, ЭНЕРГИЯ ОДНА, А ФОРМ МНОГО. ТАК ЧТО ЛИ?
И ХОТЯ ЭТИ ФОРМЫ МОГУТ БЫТЬ ОЧЕНЬ РАЗНЫМИ, ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ НЕ МЕНЯЕТСЯ. ЭТО ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ.
Общее количество энергии постоянно
РАССМОТРИМ, 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!
ДЗЫНЬ
ДЗЫНЬ


ЭЛЕКТРОМОБИЛЬ, НАОБОРОТ, ПРЕОБРАЗУЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ В КИНЕТИЧЕСКУЮ.
Электрическая энергия
Кинетическая энергия
А ЧТО НАСЧЁТ ОБЫЧНЫХ МАШИН?
БЕНЗИНОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ АВТОМОБИЛЯ - ЭТО ОДИН ИЗ ВИДОВ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ,
ОН ПРЕОБРАЗУЕТ ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ В КИНЕТИЧЕСКУЮ, И АВТОМОБИЛЬ ЕДЕТ.
Тепловая энергия
Кинетическая энергия
ЭТА ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ ОБРАЗУЕТСЯ ИЗ ХИМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РЕЗУЛЬТАТЕ РЕАКЦИИ МЕЖДУ БЕНЗИНОМ И КИСЛОРОДОМ.
И СНОВА ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ НЕИЗМЕННО.
ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ТЕЛО ДЕЛАЕТ ТО ЖЕ САМОЕ, ИСПОЛЬЗУЯ ПИЩУ И ВОЗДУХ КАК ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ. ЗАТЕМ ОНО ПРЕОБРАЗУЕТ ИХ ХИМИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ
В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ ДВИЖЕНИЯ НАШИХ МЫШЦ И ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ, ПОДДЕРЖИВАЮЩУЮ ТЕМПЕРАТУРУ НАШЕГО ТЕЛА.

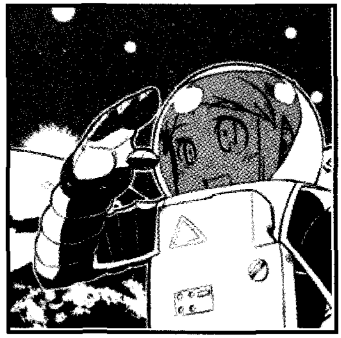

ЗНАЧИТ, ДАЖЕ ВНУТРИ НАШИХ ТЕЛ ЭНЕРГИЯ ПЕРЕХОДИТ ИЗ ОДНОЙ ФОРМЫ В ДРУГУЮ.
НАДО ЖЕ!
НАМ ЧАСТО КАЖЕТСЯ, ЧТО МЫ ПОТРАТИЛИ ЭНЕРГИЮ...
НО НА САМОМ ДЕЛЕ ОНА ПРОСТО ПЕРЕШЛА В ДРУГУЮ ФОРМУ, А ОБЩЕЕ КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ СОХРАНИЛОСЬ.
ЭНЕРГИЯ ПОСТОЯННО ЦИРКУЛИРУЕТ ПРИ НЕИЗМЕННОМ ОБЩЕМ КОЛИЧЕСТВЕ.
ЕСТЬ МНОГО ВИДОВ ЭНЕРГИИ, НО СЕЙЧАС МЫ РАССМОТРИМ...
...КИНЕТИЧЕСКУЮ И ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ, ТО ЕСТЬ МЕХАНИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ.
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ?
О НЕЙ МЫ...
...ПОГОВОРИМ ПОЗЖЕ.
НАЧНЁМ С КИНЕТИЧЕСКОЙ.
ЛАДНО!


ЭНЕРГИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ТЕЛА ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ:
ХМ...
кинетическая энергия = 1/2 × масса × модуль скорости × модуль скорости
ТЫ СКАЗАЛ МОДУЛЬ СКОРОСТИ, А НЕ СКОРОСТЬ?!
ХОРОШЕЕ ЗАМЕЧАНИЕ!
РАЗ МЫ ИСПОЛЬЗУЕМ МОДУЛЬ СКОРОСТИ, ТО КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ...
...НИКОГДА НЕ БУДЕТ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ.
ЧТО ТЫ ИМЕЕШЬ В ВИДУ?
ДАВАЙ СРАВНИМ КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ И ИМПУЛЬС.
ПОМНИШЬ УРАВНЕНИЕ?
импульс = масса × скорость
ДА, ДА...


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.
1 м/с
1 кг
Импульс = 1 кг · м/с
КЭ = 0.5 Дж.
НО ВОТ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ (КЭ) ПЕРВОГО ТЕЛА РАВНА
$1/2 \times 1$ кг $\times (1$ м/с$)^2 = 0.5$ Дж.
2 м/с
0.5 кг
Импульс = 1 кг · м/с
КЭ = 1 Дж.
В ТО ВРЕМЯ КАК ЭНЕРГИЯ ВТОРОГО ТЕЛА РАВНА
$1/2 \times 0.5$ кг $\times (2$ м/с$)^2 = 1$ Дж.


ПОДОЖДИ!
ЧТО ТАКОЕ ДЖ?
ДЖ ОЗНАЧАЕТ ДЖОУЛЬ, ЕДИНИЦУ ЭНЕРГИИ.
1 Дж = 1 кг · м²/с².
ДА?
ОДИН ДЖОУЛЬ СООТВЕТСТВУЕТ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ПОДНЯТЬ НА 1 МЕТР ГРУЗ МАССОЙ 102 Г.
102 г
ЭНЕРГИЮ В ДЖОУЛЯХ МОЖНО ПЕРЕСЧИТАТЬ В КИЛОВАТТ-ЧАСЫ (В КОТОРЫХ ИЗМЕРЯЕТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ)
Пирожное массой 50 г содержит около 170 килокалорий, или 710 000 Дж.
1 Дж
0.2389 кал
2.78 × 10⁻⁷ кВт·ч
ИЛИ В КИЛОКАЛОРИИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И НАГРЕВАЕМЫХ ЖИДКОСТЕЙ.
ОЙ!
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ ПИРОЖНОГО
В ДЖОУЛЯХ ДОВОЛЬНО ВЕЛИКА.
ЧТО?
АХ, ДА, КОНЕЧНО.
...

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

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

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:

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

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.

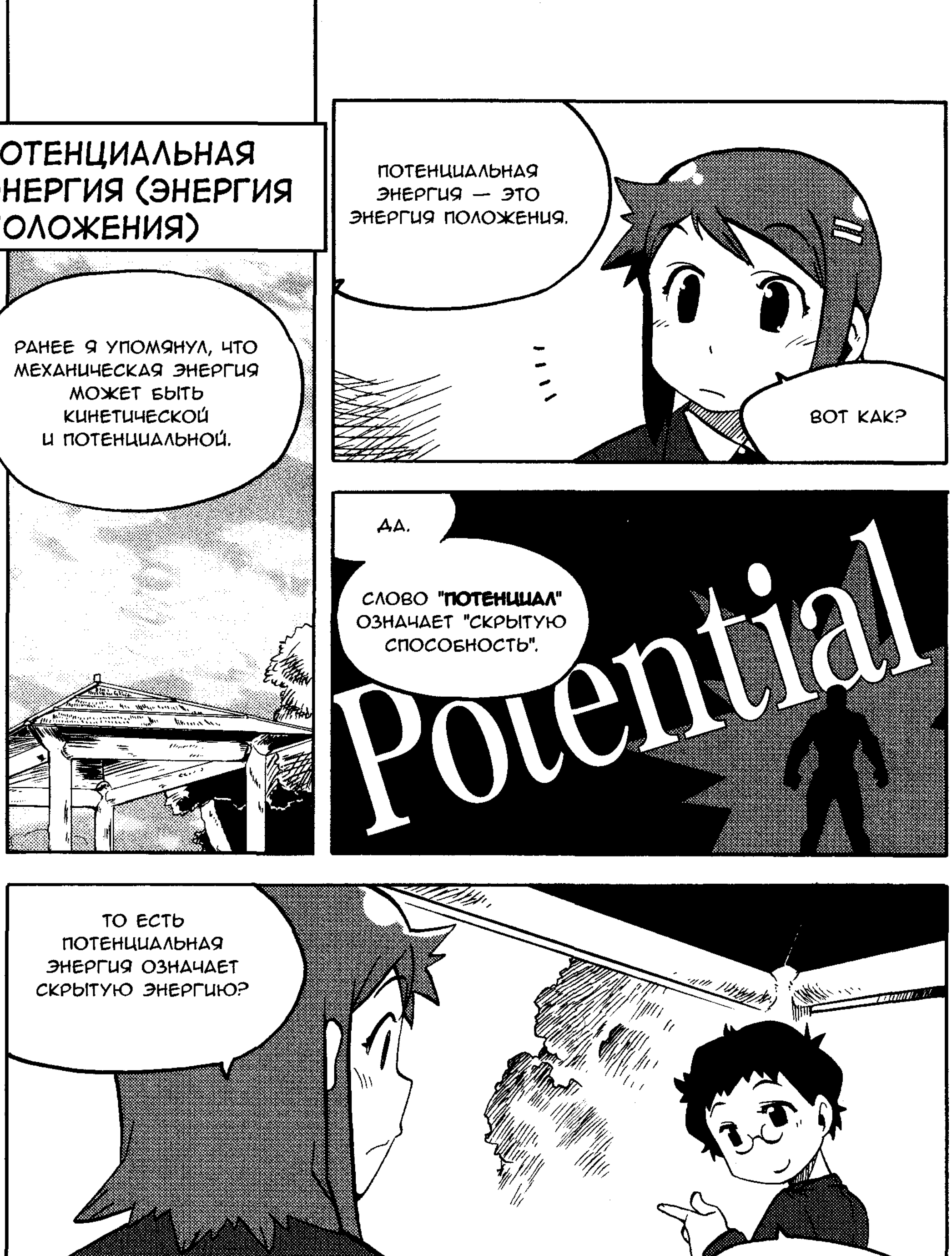
Ну, хорошо.

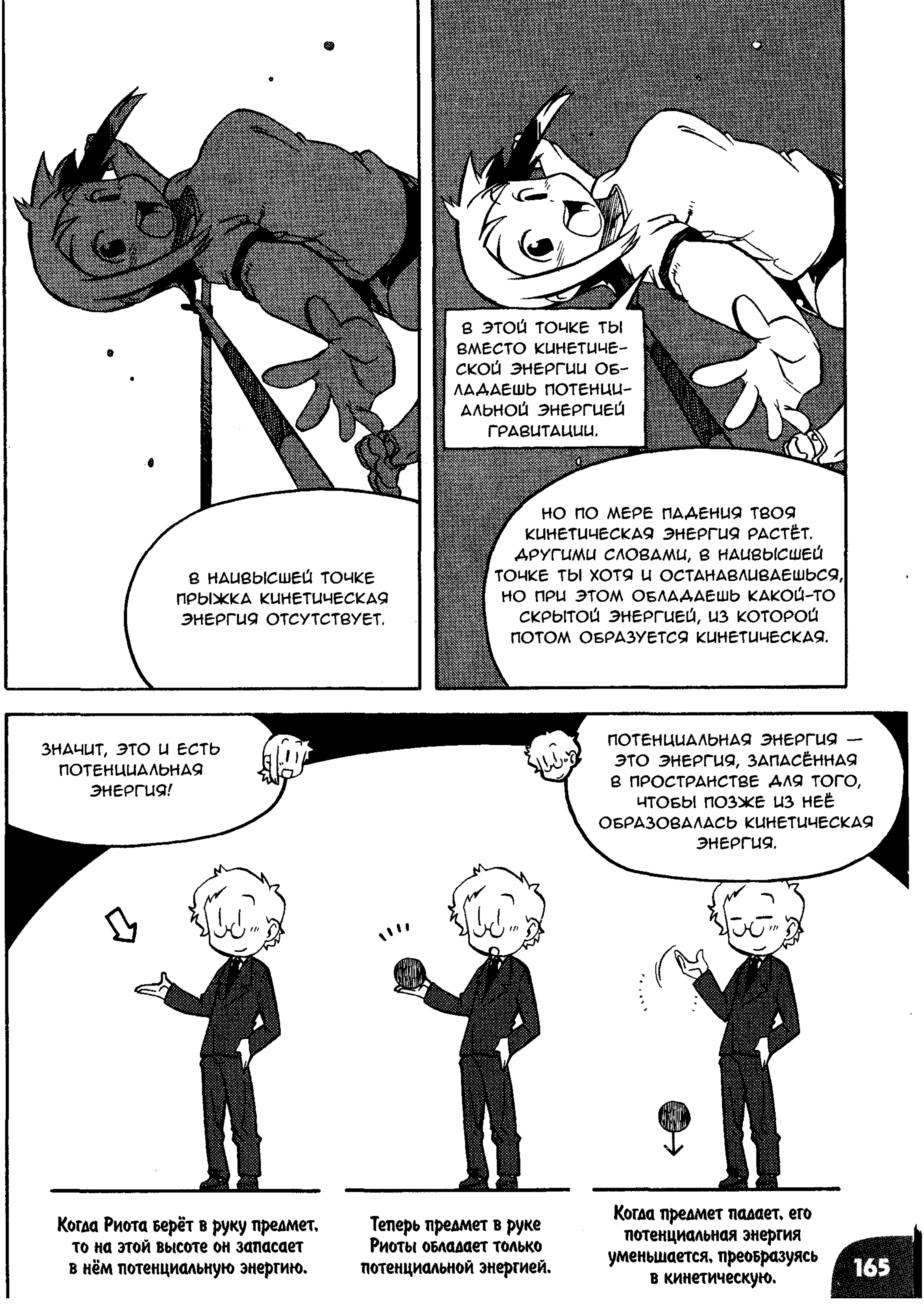
Непосредственно измерить энергию организма сложно, но мы можем определить энергию, переданную или полученную организмом от другого тела.

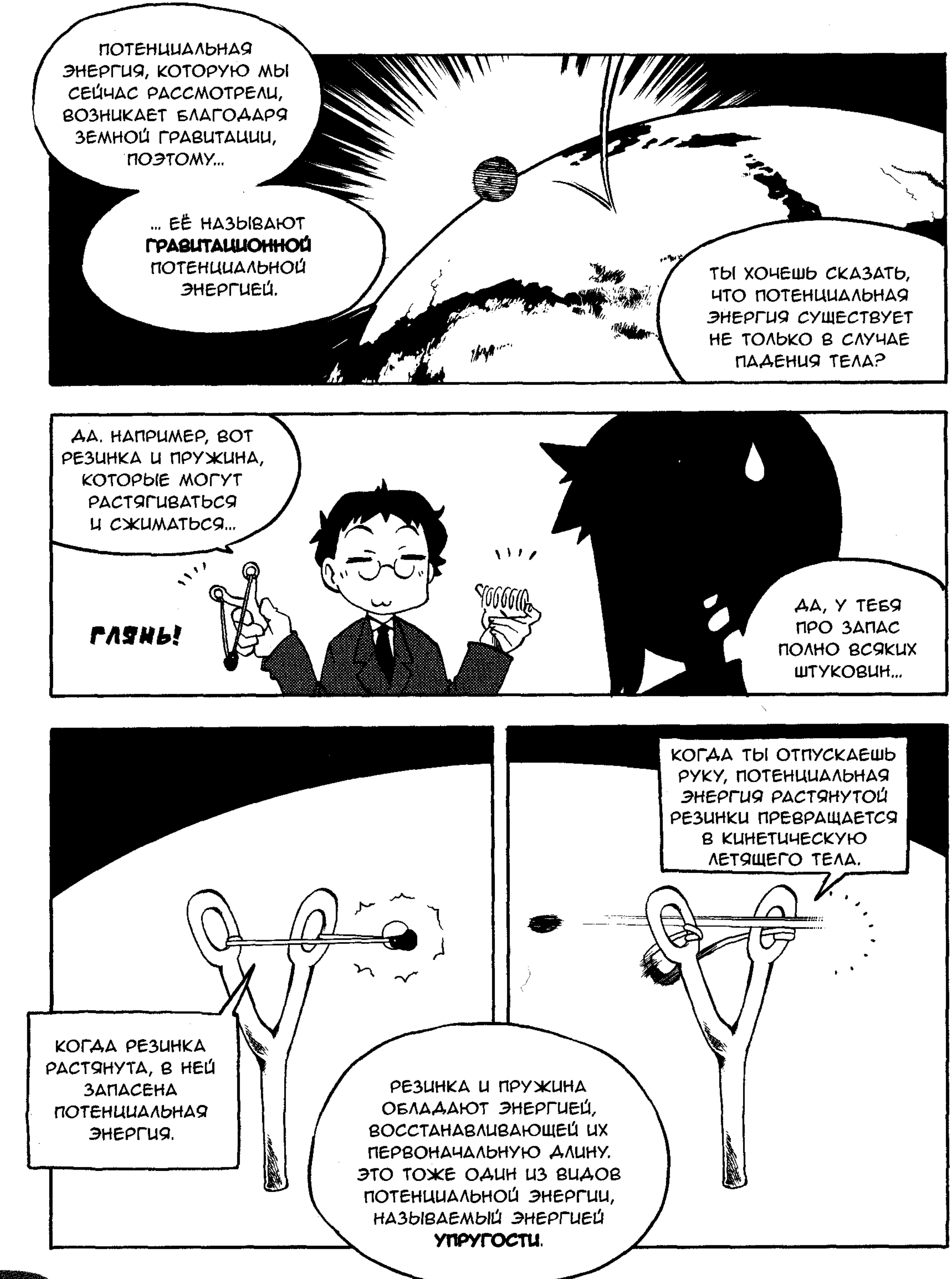
Другими словами, можно считать, что я потеряла ровно столько энергии, сколько передала ключу, который я бросила?

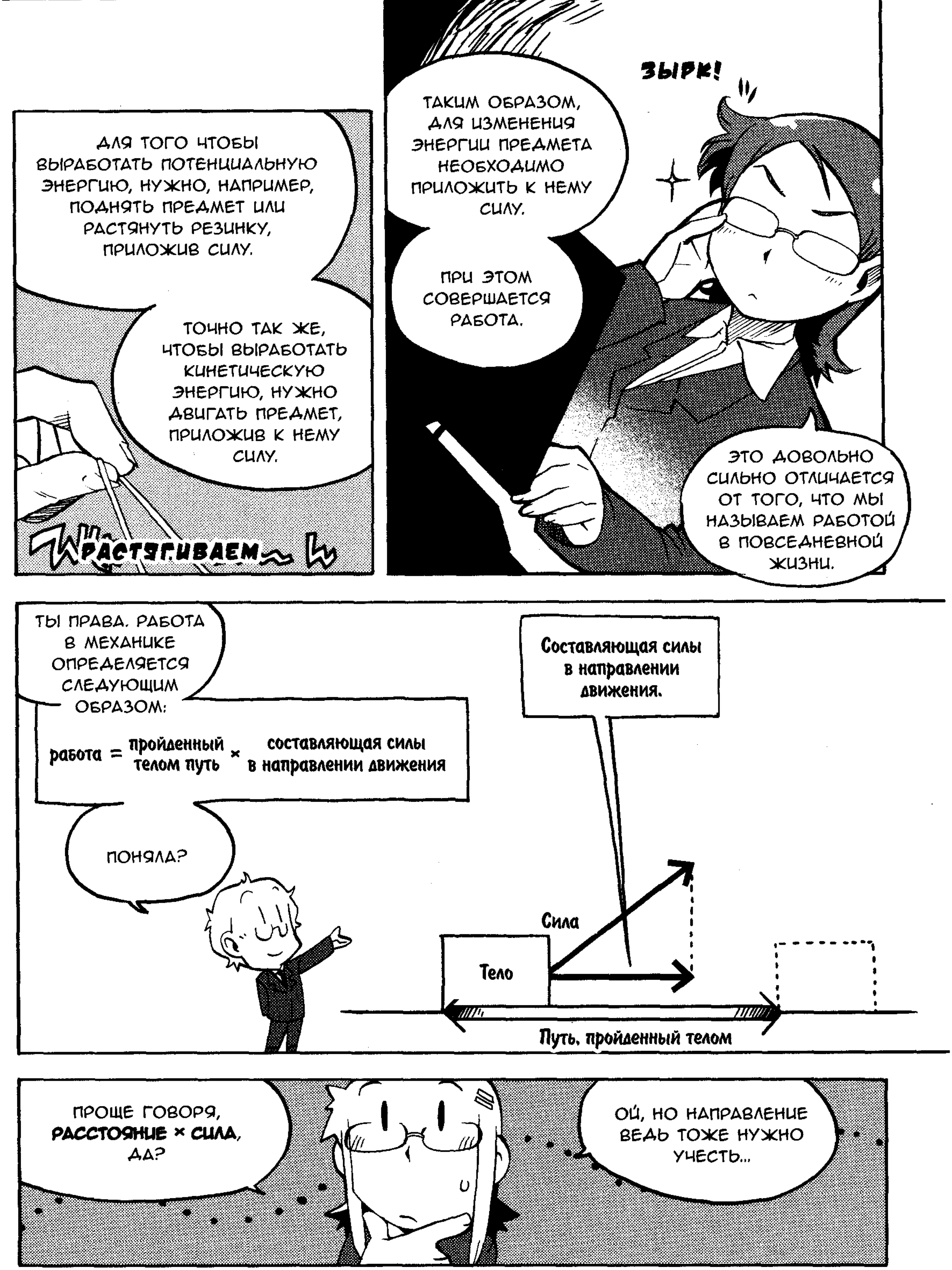
Да. И в основе этого тоже лежит закон сохранения энергии. Теперь ты, наверное, понимаешь, почему такие величины, как энергия и импульс, необходимо рассматривать отдельно друг от друга.

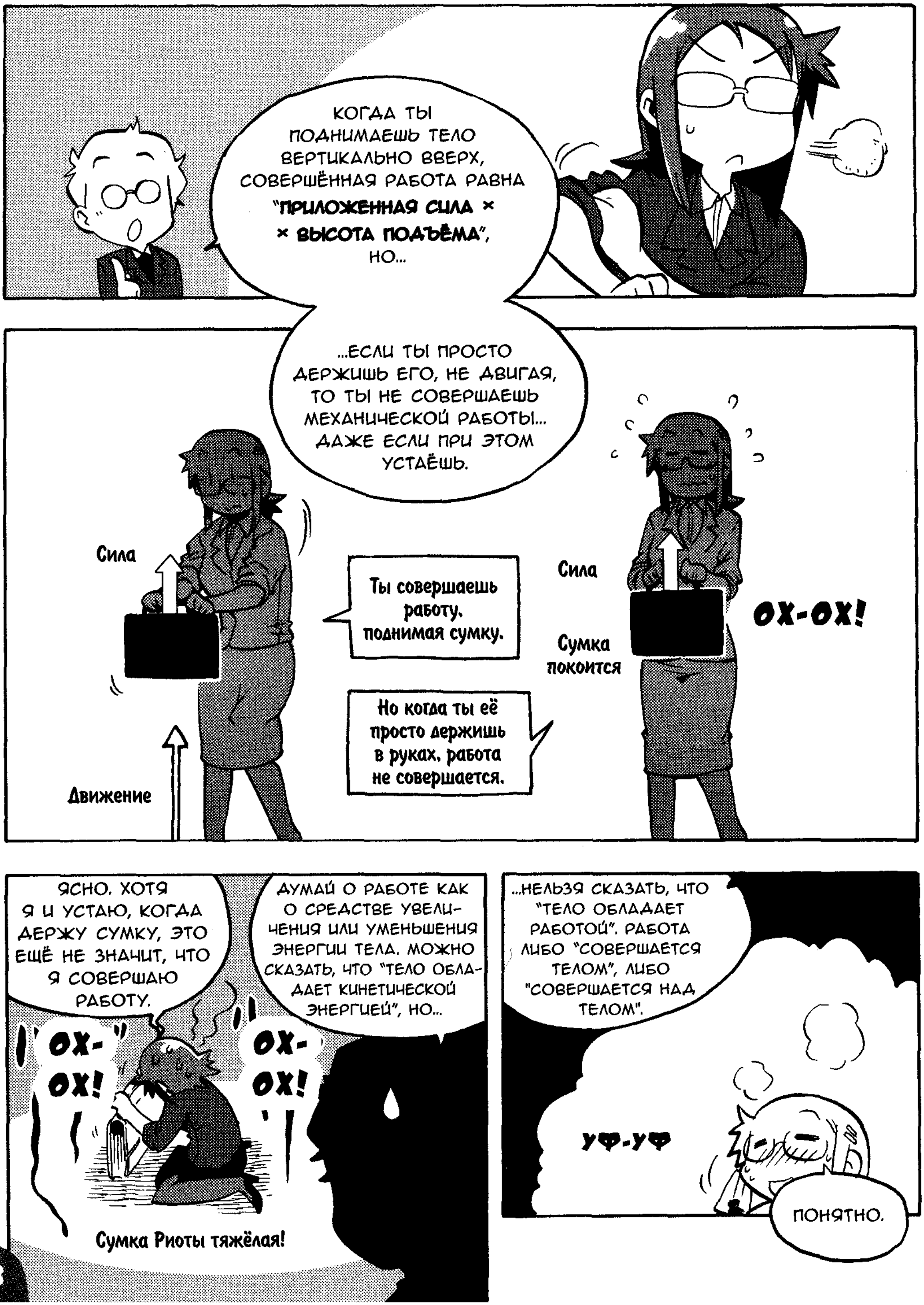
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ (ЭНЕРГИЯ ПОЛОЖЕНИЯ)



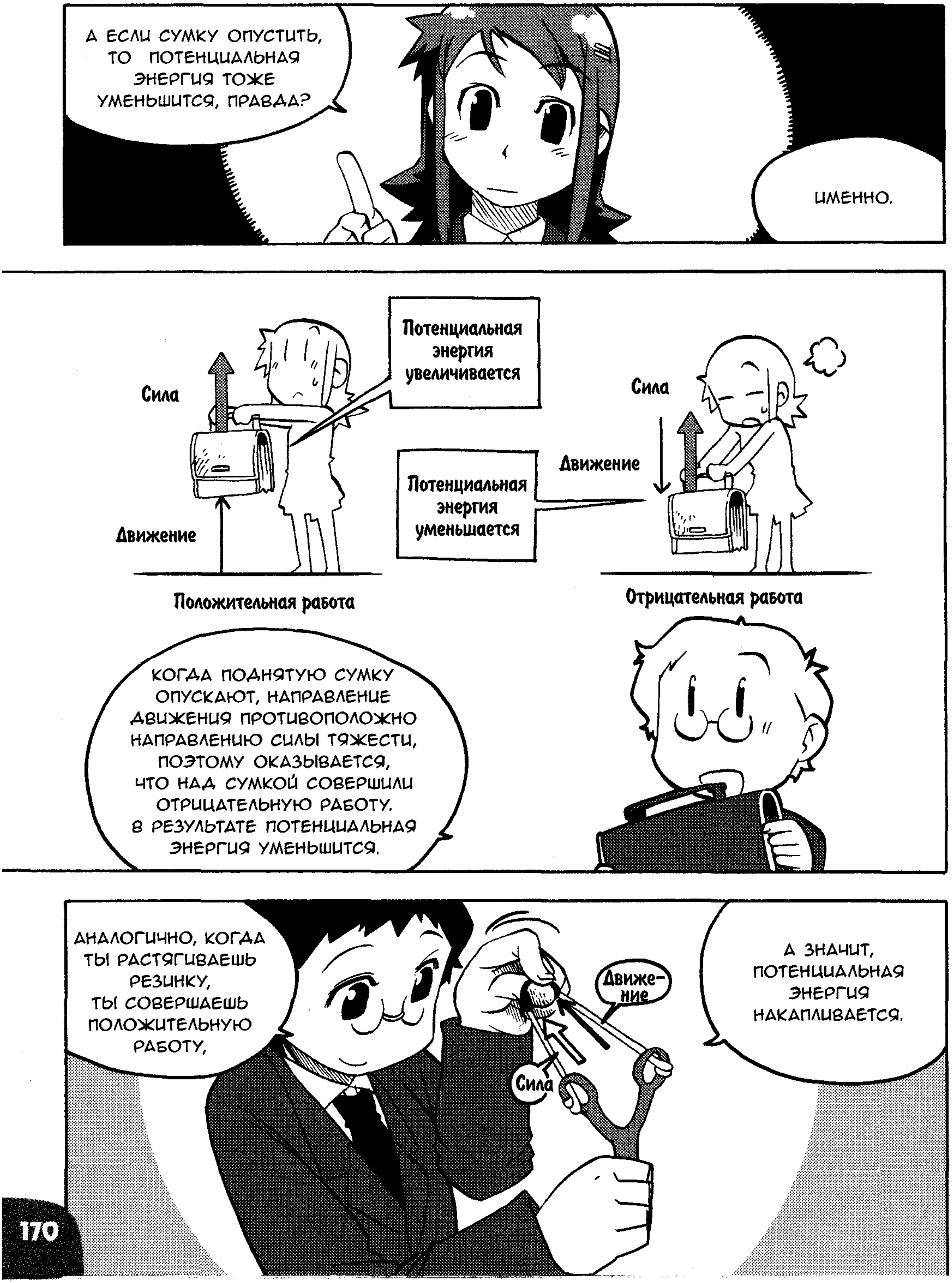

В ЭТОЙ ТОЧКЕ ТЫ ВМЕСТО КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОБЛАДАЕШЬ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ ГРАВИТАЦИИ.
В НАИВЫСШЕЙ ТОЧКЕ ПРЫЖКА КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ОТСУТСТВУЕТ.
НО ПО МЕРЕ ПАДЕНИЯ ТВОЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ РАСТЁТ. ДРУГИМИ СЛОВАМИ, В НАИВЫСШЕЙ ТОЧКЕ ТЫ ХОТЯ И ОСТАНАВЛИВАЕШЬСЯ, НО ПРИ ЭТОМ ОБЛАДАЕШЬ КАКОЙ-ТО СКРЫТОЙ ЭНЕРГИЕЙ, ИЗ КОТОРОЙ ПОТОМ ОБРАЗУЕТСЯ КИНЕТИЧЕСКАЯ.
ЗНАЧИТ, ЭТО И ЕСТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ!
ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ — ЭТО ЭНЕРГИЯ, ЗАПАСЁННАЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ ПОЗЖЕ ИЗ НЕЁ ОБРАЗОВАЛАСЬ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ.
Когда Риота 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.

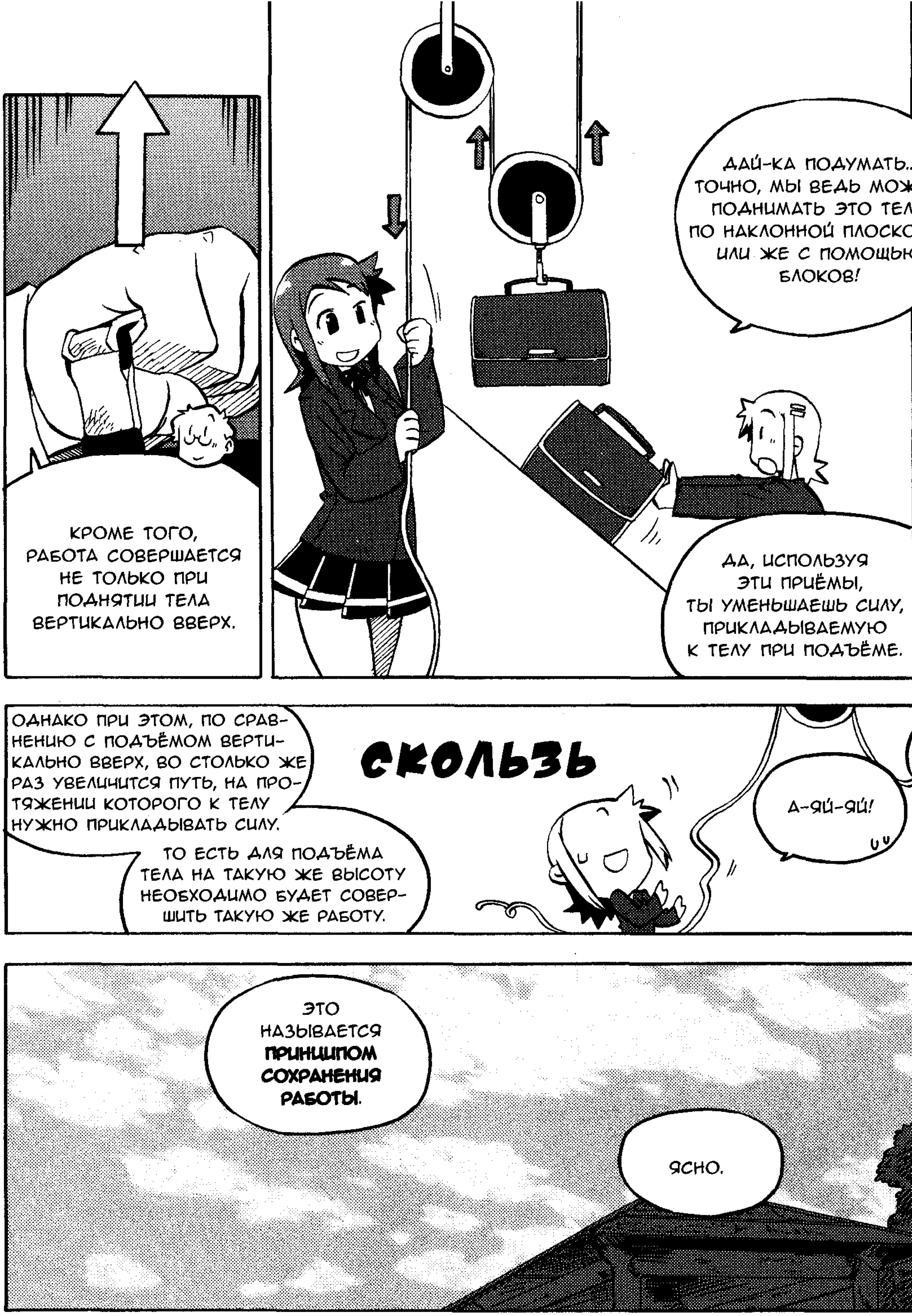

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ, КОТОРУЮ МЫ СЕЙЧАС РАССМОТРЕЛИ, ВОЗНИКАЕТ БЛАГОДАРЯ ЗЕМНОЙ ГРАВИТАЦИИ, ПОЭТОМУ...
... ЕЁ НАЗЫВАЮТ **ГРАВИТАЦИОННОЙ** ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИЕЙ.
ТЫ ХОЧЕШЬ СКАЗАТЬ, ЧТО ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СУЩЕСТВУЕТ НЕ ТОЛЬКО В СЛУЧАЕ ПАДЕНИЯ ТЕЛА?
ДА. НАПРИМЕР, ВОТ РЕЗИНКА И ПРУЖИНА, КОТОРЫЕ МОГУТ РАСТЯГИВАТЬСЯ И СЖИМАТЬСЯ...
ГЛЯНЬ!
ДА, У ТЕБЯ ПРО ЗАПАС ПОЛНО ВСЯКИХ ШТУКОВИН...
КОГДА РЕЗИНКА РАСТЯНУТА, В НЕЙ ЗАПАСЕНА ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.
КОГДА ТЫ ОТПУСКАЕШЬ РУКУ, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ РАСТЯНУТОЙ РЕЗИНКИ ПРЕВРАЩАЕТСЯ В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЛЕТЯЩЕГО ТЕЛА.
РЕЗИНКА И ПРУЖИНА ОБЛАДАЮТ ЭНЕРГИЕЙ, ВОССТАНАВЛИВАЮЩЕЙ ИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНУЮ ДЛИНУ. ЭТО ТОЖЕ ОДИН ИЗ ВИДОВ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, НАЗЫВАЕМЫЙ ЭНЕРГИЕЙ **УПРУГОСТИ**.


ДЛЯ ТОГО ЧТОБЫ ВЫРАБОТАТЬ ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ ЭНЕРГИЮ, НУЖНО, НАПРИМЕР, ПОДНЯТЬ ПРЕДМЕТ ИЛИ РАСТЯНУТЬ РЕЗИНКУ, ПРИЛОЖИВ СИЛУ.
ТОЧНО ТАК ЖЕ, ЧТОБЫ ВЫРАБОТАТЬ КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ, НУЖНО ДВИГАТЬ ПРЕДМЕТ, ПРИЛОЖИВ К НЕМУ СИЛУ.
РАСТЯГИВАЕМ~
ЗЫРК!
ТАКИМ ОБРАЗОМ, ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРЕДМЕТА НЕОБХОДИМО ПРИЛОЖИТЬ К НЕМУ СИЛУ.
ПРИ ЭТОМ СОВЕРШАЕТСЯ РАБОТА.
ЭТО ДОВОЛЬНО СИЛЬНО ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ ТОГО, ЧТО МЫ НАЗЫВАЕМ РАБОТОЙ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ.
ТЫ ПРАВА. РАБОТА В МЕХАНИКЕ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ СЛЕДУЮЩИМ ОБРАЗОМ:
работа = пройденный телом путь × составляющая силы в направлении движения
ПОНЯЛА?
Составляющая силы в направлении движения.
Сила
Тело
Путь, пройденный телом
ПРОЩЕ ГОВОРЯ, **РАССТОЯНИЕ × СИЛА**, ДА?
ОЙ, НО НАПРАВЛЕНИЕ ВЕДЬ ТОЖЕ НУЖНО УЧЕСТЬ...


КОГДА ТЫ ПОДНИМАЕШЬ ТЕЛО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ, СОВЕРШЁННАЯ РАБОТА РАВНА "ПРИЛОЖЕННАЯ СИЛА × × ВЫСОТА ПОДЪЁМА", НО...
...ЕСЛИ ТЫ ПРОСТО ДЕРЖИШЬ ЕГО, НЕ ДВИГАЯ, ТО ТЫ НЕ СОВЕРШАЕШЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ РАБОТЫ... ДАЖЕ ЕСЛИ ПРИ ЭТОМ УСТАЁШЬ.
Сила
Ты совершаешь работу, поднимая сумку.
Движение
Сила
Сумка покоится
ОХ-ОХ!
Но когда ты её просто держишь в руках, работа не совершается.
ЯСНО. ХОТЯ Я И УСТАЮ, КОГДА ДЕРЖУ СУМКУ, ЭТО ЕЩЁ НЕ ЗНАЧИТ, ЧТО Я СОВЕРШАЮ РАБОТУ.
ДУМАЙ О РАБОТЕ КАК О СРЕДСТВЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ИЛИ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГИИ ТЕЛА. МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО "ТЕЛО ОБЛАДАЕТ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ", НО...
ОХ-ОХ!
ОХ-ОХ!
Сумка Риоты тяжёлая!
...НЕЛЬЗЯ СКАЗАТЬ, ЧТО "ТЕЛО ОБЛАДАЕТ РАБОТОЙ". РАБОТА ЛИБО "СОВЕРШАЕТСЯ ТЕЛОМ", ЛИБО "СОВЕРШАЕТСЯ НАД ТЕЛОМ".
УФ-УФ
ПОНЯТНО.

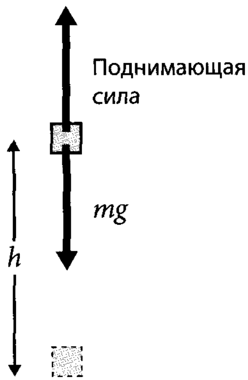
РАБОТА И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ


А ЕСЛИ СУМКУ ОПУСТИТЬ, ТО ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ТОЖЕ УМЕНЬШИТСЯ, ПРАВДА?
ИМЕННО.
Потенциальная энергия увеличивается
Сила
Движение
Положительная работа
Сила
Движение
Потенциальная энергия уменьшается
Отрицательная работа
КОГДА ПОДНЯТУЮ СУМКУ ОПУСКАЮТ, НАПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПРОТИВОПОЛОЖНО НАПРАВЛЕНИЮ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ, ПОЭТОМУ ОКАЗЫВАЕТСЯ, ЧТО НАД СУМКОЙ СОВЕРШИЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНУЮ РАБОТУ. В РЕЗУЛЬТАТЕ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ УМЕНЬШИТСЯ.
АНАЛОГИЧНО, КОГДА ТЫ РАСТЯГИВАЕШЬ РЕЗИНКУ, ТЫ СОВЕРШАЕШЬ ПОЛОЖИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ,
Движение
Сила
А ЗНАЧИТ, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ НАКАПЛИВАЕТСЯ.


КРОМЕ ТОГО, РАБОТА СОВЕРШАЕТСЯ НЕ ТОЛЬКО ПРИ ПОДНЯТИИ ТЕЛА ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ.
ДАЙ-КА ПОДУМАТЬ... ТОЧНО, МЫ ВЕДЬ МОЖЕМ ПОДНИМАТЬ ЭТО ТЕЛО ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ИЛИ ЖЕ С ПОМОЩЬЮ БЛОКОВ!
ДА, ИСПОЛЬЗУЯ ЭТИ ПРИЁМЫ, ТЫ УМЕНЬШАЕШЬ СИЛУ, ПРИКЛАДЫВАЕМУЮ К ТЕЛУ ПРИ ПОДЪЁМЕ.
ОДНАКО ПРИ ЭТОМ, ПО СРАВНЕНИЮ С ПОДЪЁМОМ ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ, ВО СТОЛЬКО ЖЕ РАЗ УВЕЛИЧИТСЯ ПУТЬ, НА ПРОТЯЖЕНИИ КОТОРОГО К ТЕЛУ НУЖНО ПРИКЛАДЫВАТЬ СИЛУ.
СКОЛЬЗЬ
А-ЯЙ-ЯЙ!
ТО ЕСТЬ ДЛЯ ПОДЪЁМА ТЕЛА НА ТАКУЮ ЖЕ ВЫСОТУ НЕОБХОДИМО БУДЕТ СОВЕРШИТЬ ТАКУЮ ЖЕ РАБОТУ.
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ **ПРИНЦИПОМ СОХРАНЕНИЯ РАБОТЫ**.
ЯСНО.

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

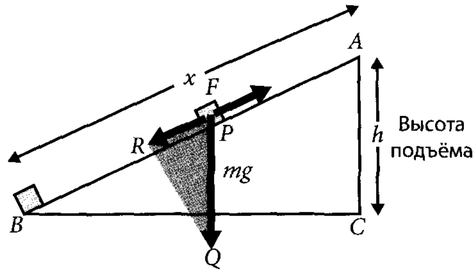
работа подъёма = поднимающая сила × высота h = mgh.

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.

Давай обсудим!



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

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, ΔABC, представляющий собой горку, по которой двигают груз, и ΔPQR, образованный разложением силы тяжести mg на составляющие, являются прямоугольными, и угол CAB = углу RPQ. 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

$$Fx = mgh.$$

Давай обсудим!

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

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

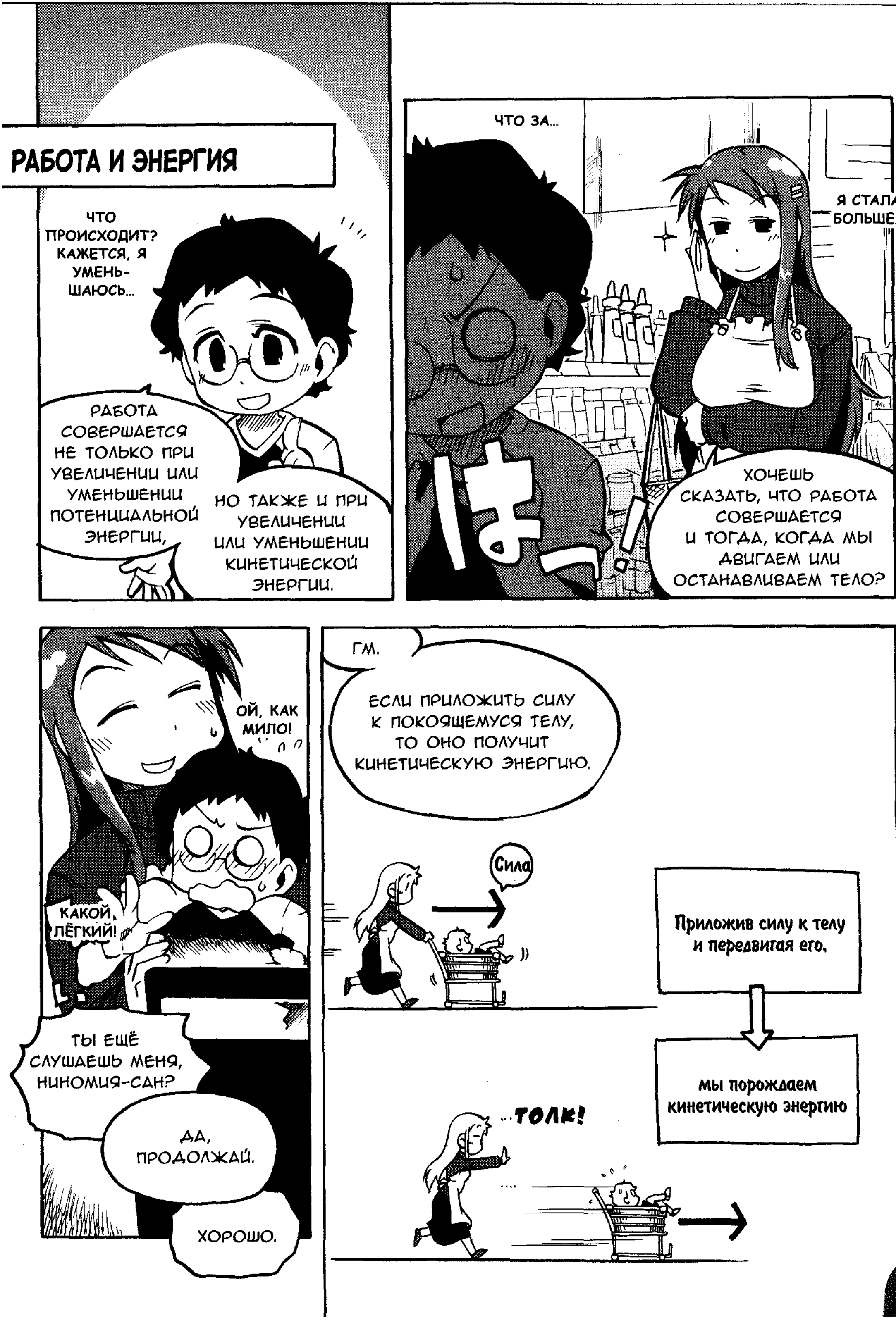
Значит, какой бы способ мы ни выбрали, совершённая работа будет одинаковой.

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

А когда мы опускаем тело, получается, что мы совершаем 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

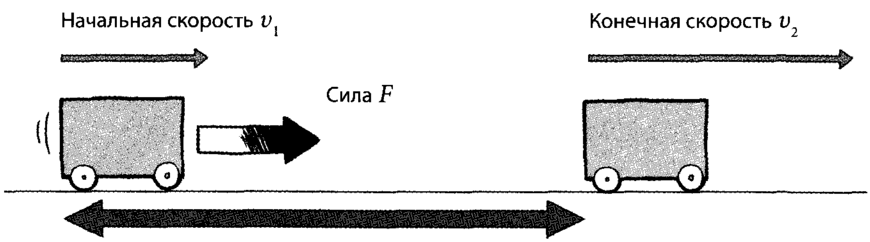



ЭТО СПРАВЕДЛИВО И ДЛЯ УЖЕ ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ. ЕСЛИ ПРОДОЛЖАТЬ ПРИКЛАДЫВАТЬ СИЛУ В НАПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА,
ТО ЕГО КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ЕЩЁ БОЛЬШЕ УВЕЛИЧИТСЯ.
ШАРИК В ПИНБОЛЕ ТОЖЕ ЛЕТАЕТ ПО ТАКОМУ ПРИНЦИПУ...
ЕСТЬ СИЛА, ЕСТЬ ПРОЙДЕННЫЙ ПУТЬ, ЗНАЧИТ, ЕСТЬ И РАБОТА. И МОЖНО ЗАПИСАТЬ:
Изменение кинетической энергии тела = = работа, совершённая над телом
ЭТО РАВЕНСТВО ДОЛЖНО ВЫПОЛНЯТЬСЯ.
ПОНЯТНО.
ЕСЛИ НАПРАВЛЕНИЕ ПРИКЛАДЫВАЕМОЙ К ТЕЛУ СИЛЫ СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ ЕГО ДВИЖЕНИЯ...
...ТО ЕСТЬ СИЛА И СКОРОСТЬ НАПРАВЛЕНЫ В ОДНУ СТОРОНУ, ТО МЫ СОВЕРШАЕМ ПОЛОЖИТЕЛЬНУЮ РАБОТУ.


СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ИЗМЕНЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТОЖЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНО, ТО ЕСТЬ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.
МАМА, КУПИ СЛАДОСТИ!
БЕГУ-БЕГУ-БЕГУ...
ТОП-ТОП-ТОП
ПО ЭТОМУ ЖЕ ПРИНЦИПУ ТЫ МОЖЕШЬ ОСТАНОВИТЬ ДВИЖУЩЕЕСЯ ТЕЛО, ПРИЛОЖИВ К НЕМУ СИЛУ В НАПРАВЛЕНИИ, ПРОТИВОПОЛОЖНОМ ЕГО СКОРОСТИ.
УМЕНЬШИВ ЕГО КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ, Я ПОЛАГАЮ.
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.



То есть мы прикладываем силу к уже движущемуся телу.

В нашем случае справедливо следующее:

работа, совершённая над телом = Fx.

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

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 совершённой 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:

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

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

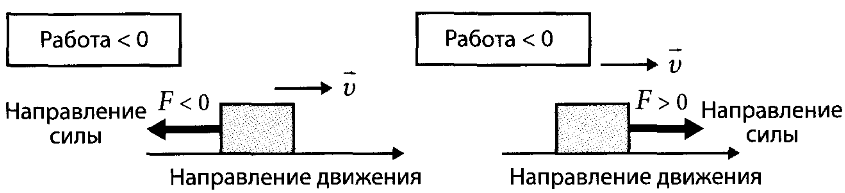
$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = Fx.$$

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:

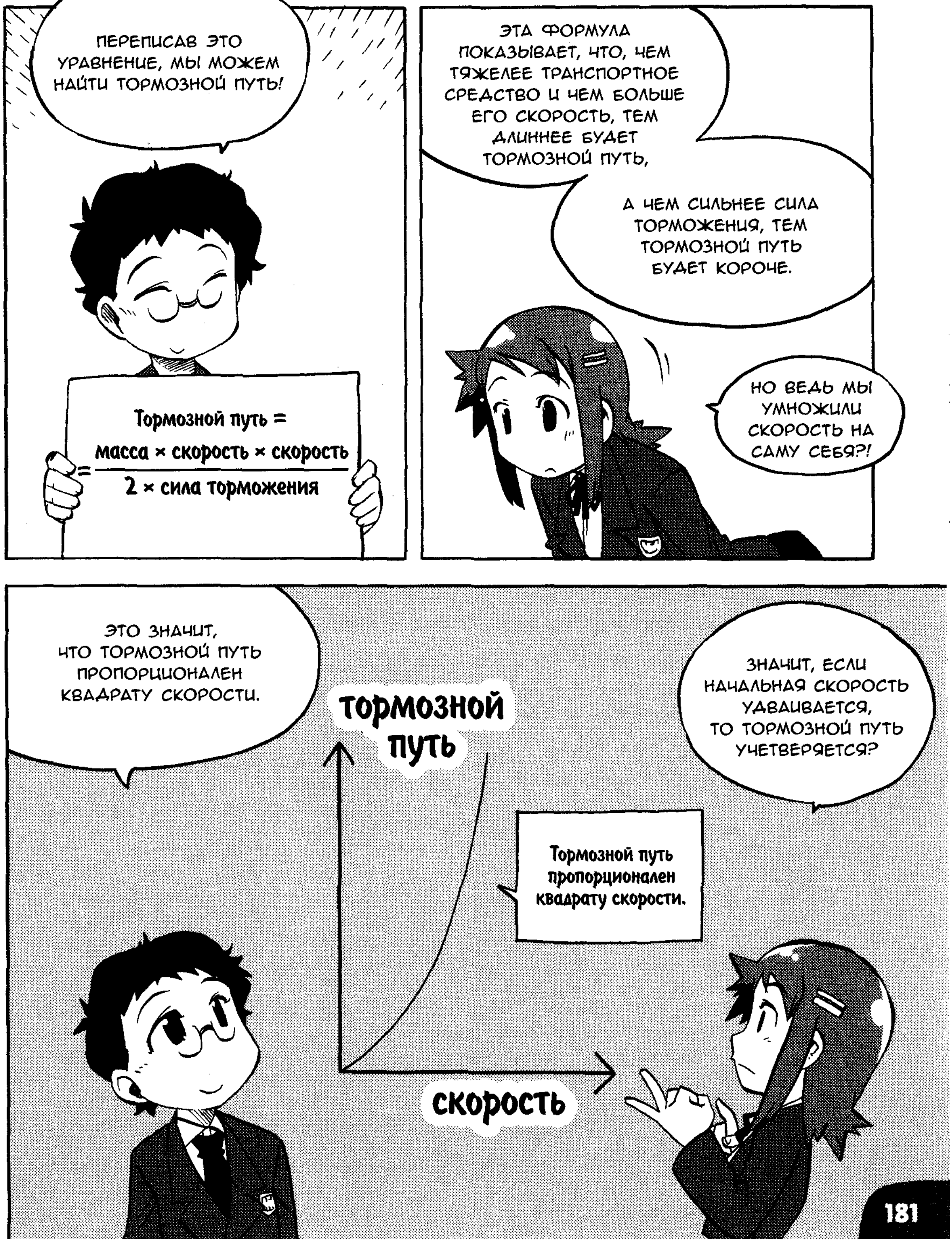
$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 > 0, \text{ или}$$

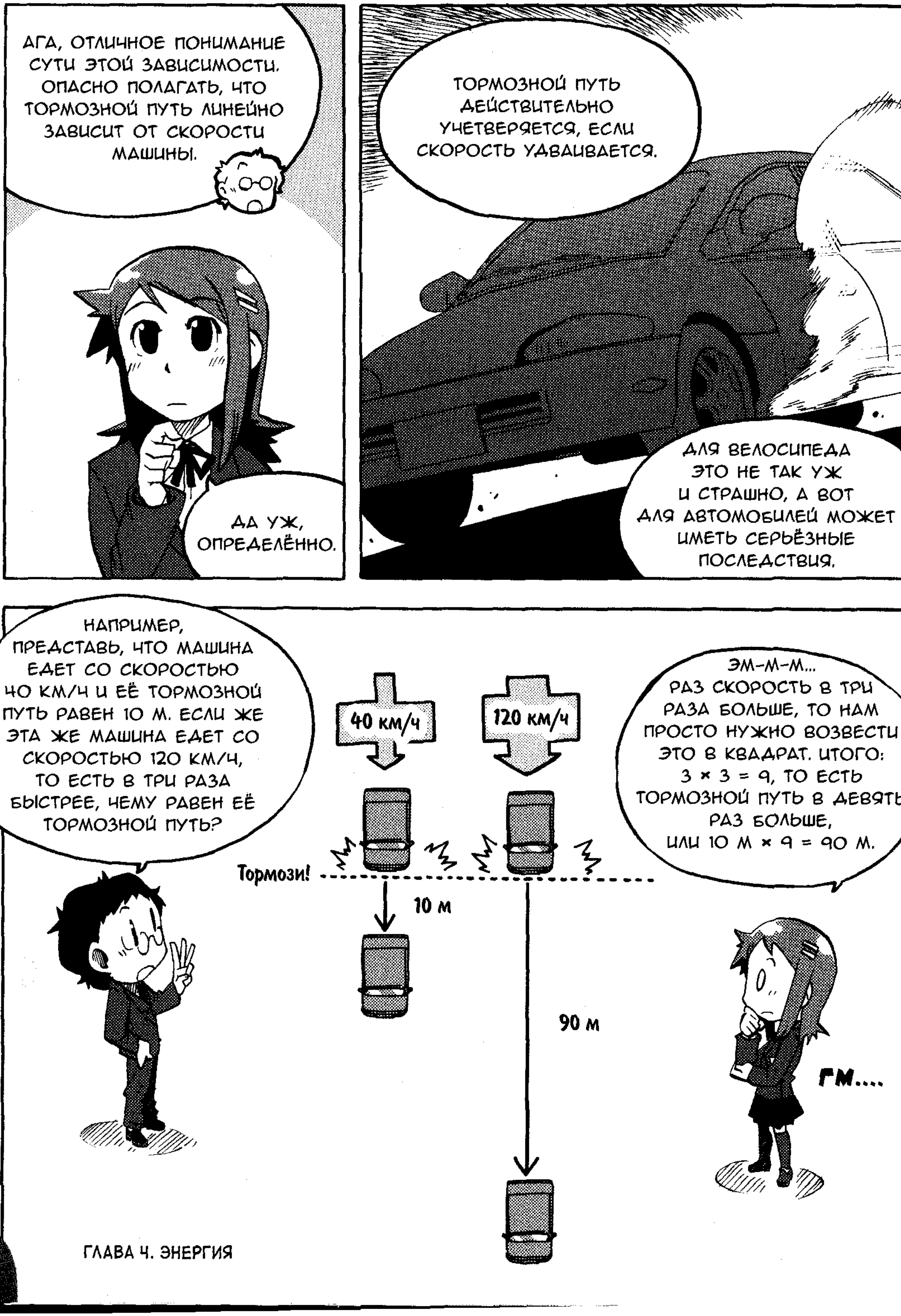
$$\frac{1}{2}mv_2^2 > \frac{1}{2}mv_1^2,$$

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

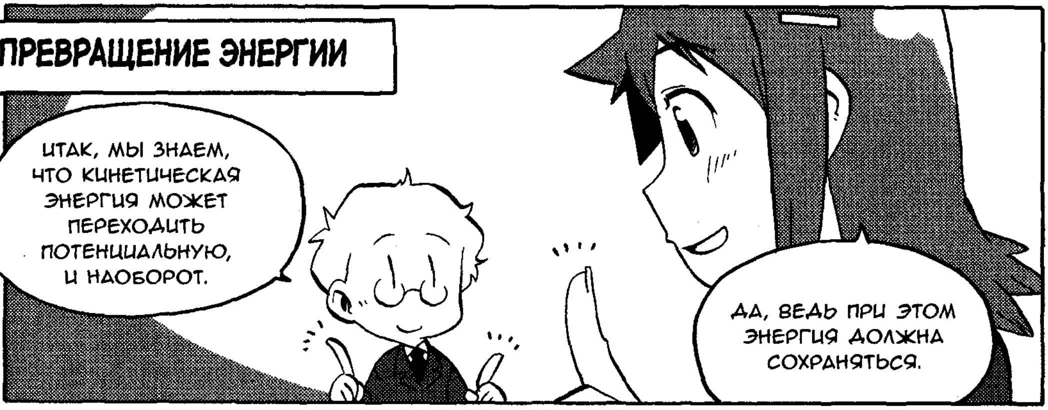

ПЕРЕПИСАВ ЭТО УРАВНЕНИЕ, МЫ МОЖЕМ НАЙТИ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ!
Тормозной путь = $\frac{\text{масса} \times \text{скорость} \times \text{скорость}}{2 \times \text{сила торможения}}$
ЭТА ФОРМУЛА ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО, ЧЕМ ТЯЖЕЛЕЕ ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО И ЧЕМ БОЛЬШЕ ЕГО СКОРОСТЬ, ТЕМ ДЛИННЕЕ БУДЕТ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ,
А ЧЕМ СИЛЬНЕЕ СИЛА ТОРМОЖЕНИЯ, ТЕМ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ БУДЕТ КОРОЧЕ.
НО ВЕДЬ МЫ УМНОЖИЛИ СКОРОСТЬ НА САМУ СЕБЯ?!
ЭТО ЗНАЧИТ, ЧТО ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ПРОПОРЦИОНАЛЕН КВАДРАТУ СКОРОСТИ.
тормозной путь
скорость
Тормозной путь пропорционален квадрату скорости.
ЗНАЧИТ, ЕСЛИ НАЧАЛЬНАЯ СКОРОСТЬ УДВАИВАЕТСЯ, ТО ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ УЧЕТВЕРЯЕТСЯ?

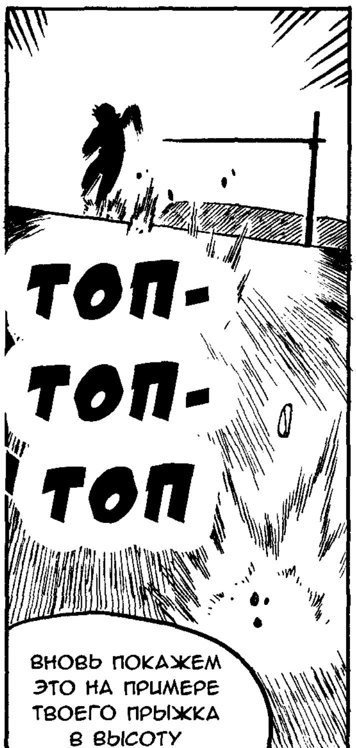

АГА, ОТЛИЧНОЕ ПОНИМАНИЕ СУТИ ЭТОЙ ЗАВИСИМОСТИ. ОПАСНО ПОЛАГАТЬ, ЧТО ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ЛИНЕЙНО ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ МАШИНЫ.
ДА УЖ, ОПРЕДЕЛЁННО.
ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ДЕЙСТВИТЕЛЬНО УЧЕТВЕРЯЕТСЯ, ЕСЛИ СКОРОСТЬ УДВАИВАЕТСЯ.
ДЛЯ ВЕЛОСИПЕДА ЭТО НЕ ТАК УЖ И СТРАШНО, А ВОТ ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ МОЖЕТ ИМЕТЬ СЕРЬЁЗНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ.
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
Тормози!
10 м
90 м
ЭМ-М-М... РАЗ СКОРОСТЬ В ТРИ РАЗА БОЛЬШЕ, ТО НАМ ПРОСТО НУЖНО ВОЗВЕСТИ ЭТО В КВАДРАТ. ИТОГО: 3 × 3 = 9, ТО ЕСТЬ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ В ДЕВЯТЬ РАЗ БОЛЬШЕ, ИЛИ 10 М × 9 = 90 М.
ГМ....


КАК ТЫ ДУМАЕШЬ, ЧТО СЛУЧИТСЯ, ЕСЛИ ВОДИТЕЛЬ БУДЕТ ДУМАТЬ, ЧТО ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ЛИНЕЙНО ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ?
ВРРР
Водитель
ПОРА БЫ УЖЕ НАЧАТЬ ТОРМОЗИТЬ!
ЕСЛИ МЫ ОШИБОЧНО ПРЕДПОЛОЖИМ, ЧТО НАШ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ЛИНЕЙНО ЗАВИСИТ ОТ СКОРОСТИ, ТО ПОЛУЧИМ ВСЕГО 30 М И ПРОМАХНЁМСЯ НА 60 М!
НЕ БЕСПОКОЙСЯ, У НАС ЕЩЁ ЕСТЬ ВРЕМЯ!
ВРРР
НЕСМОТРЯ НА УВЕРЕННОСТЬ ВОДИТЕЛЯ, МОЖЕТ ПРОИЗОЙТИ СТРАШНАЯ АВАРИЯ, ВЕДЬ ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ГОРАЗДО БОЛЬШЕ.
Я СЛЫШАЛ, ВО ВСЕХ АВТОШКОЛАХ УЧАТ, ЧТО ТОРМОЗНОЙ ПУТЬ ПРОПОРЦИОНАЛЕН КВАДРАТУ СКОРОСТИ.
О, НАВЕРНЯКА.
ОЙ, ЧТО ЭТО?

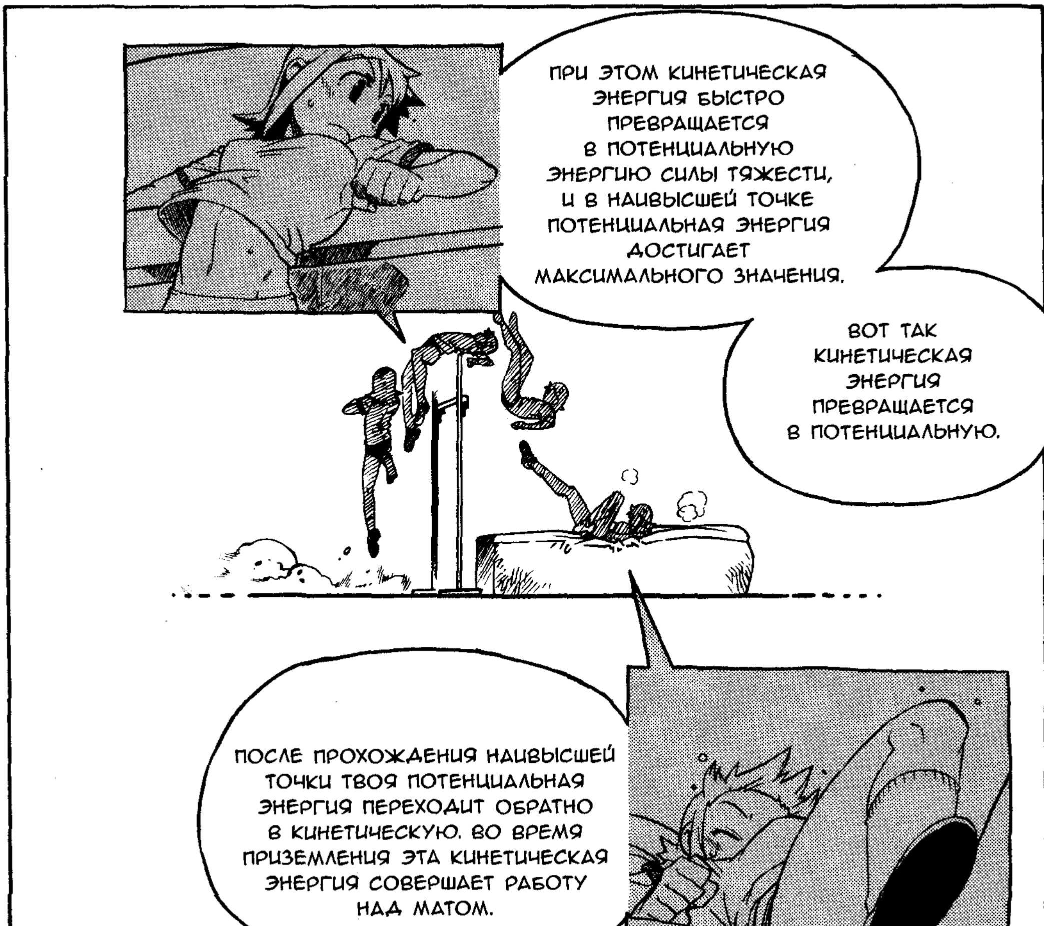
4.2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭНЕРГИИ





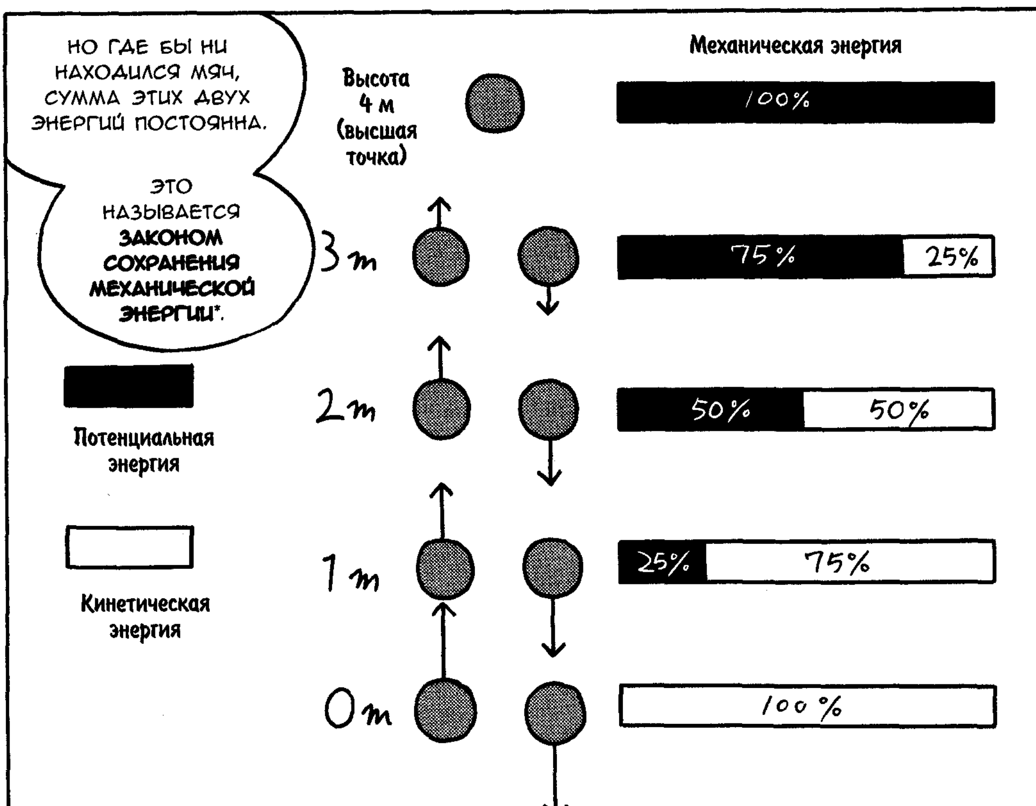

После толчка, чем выше ты подлетаешь, тем меньше кинетической энергии у тебя остаётся.
Прыг!
В наивысшей точке у тебя нет кинетической энергии, так как твоя скорость равна нулю.


При этом кинетическая энергия быстро превращается в потенциальную энергию силы тяжести, и в наивысшей точке потенциальная энергия достигает максимального значения.
Вот так кинетическая энергия превращается в потенциальную.
После прохождения наивысшей точки твоя потенциальная энергия переходит обратно в кинетическую. Во время приземления эта кинетическая энергия совершает работу над матом.

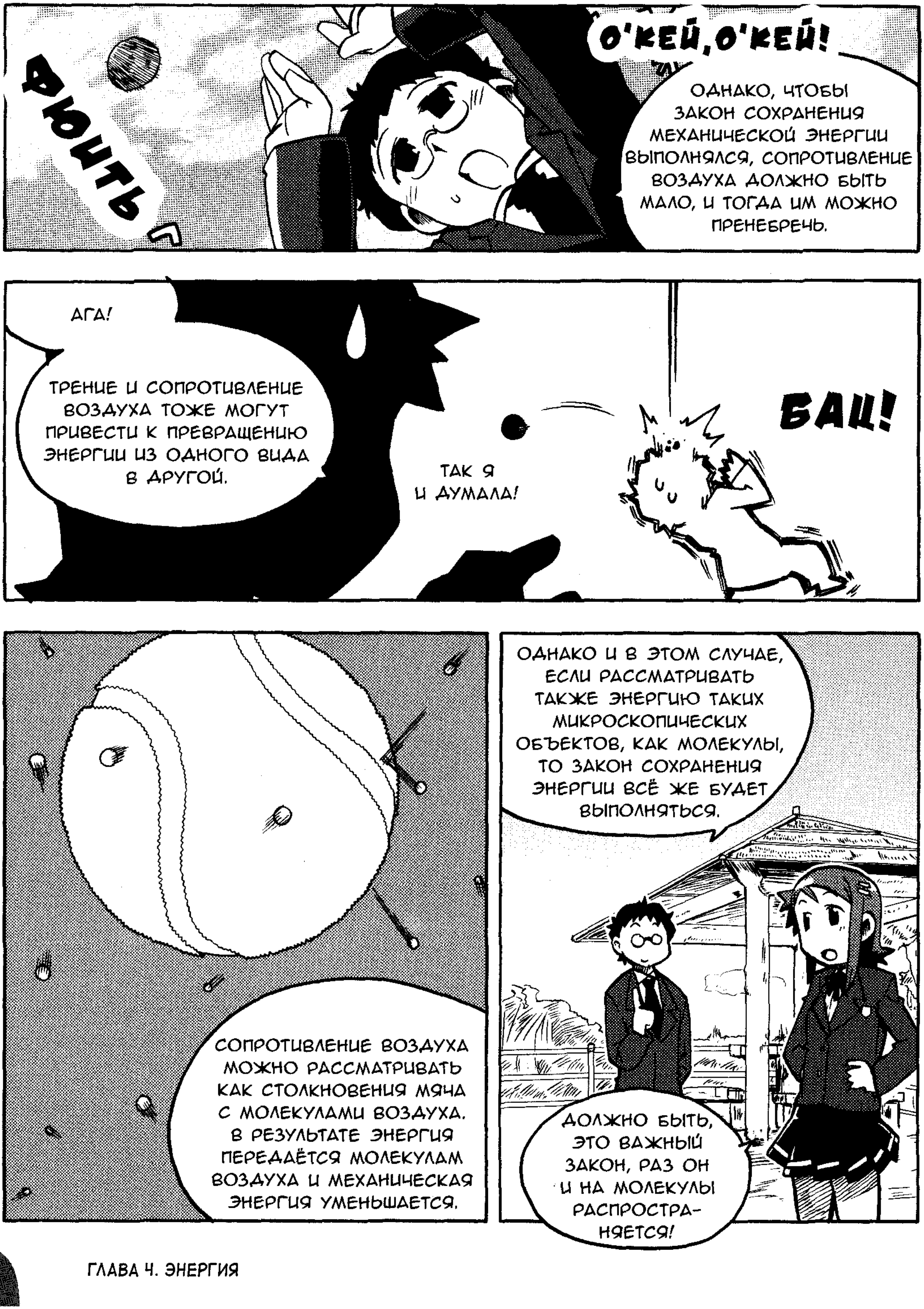

В КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ МОЖЕТ ПРЕВРАЩАТЬСЯ НЕ ТОЛЬКО ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ.
У МЕНЯ КАК РАЗ ЕСТЬ КОЕ-ЧТО НА ТАКОЙ СЛУЧАЙ. ПРОВЕДЁМ ЕЩЁ ОДИН ЭКСПЕРИМЕНТ.
ЧТО ТАМ ЕЩЁ НА ЭТОТ РАЗ?
ВОТ.
ЭТО ПОДАРОК ДЛЯ ТЕБЯ.
ПРАВДА? ДЛЯ МЕНЯ?
ЧТОБЫ ОТКРЫТЬ КОРОБОЧКУ, НАДО НАЖАТЬ КНОПКУ.
В ПРЕД-ВКУШЕНИИ
ЩЁЛК
ОЙ, ТЕБЕ НЕ СТОИЛО...
ПРЫГ!
ЧМОК!
ХЛОП!

СОХРАНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ


...ТАК ИСПУГАЕТСЯ МАЛЕНЬКОГО ИГРУШЕЧНОГО ЧЕРВЯЧКА.
ПРОСТИ.
ХМ!
ЛУЧШЕ РАССКАЗАЛ БЫ ПОДРОБНЕЕ О ВЗАИМО-ПРЕВРАЩЕНИИ КИНЕТИЧЕ-СКОЙ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ...
И ВОТ ЧТО...
НИКОГДА БОЛЬШЕ НЕ УСТРАИВАЙ МНЕ ТАКИХ ГЛУПЫХ РОЗЫГРЫШЕЙ!
И НЕ ПОСМЕЮ! Я ОБЕЩАЮ!
ЛАДНО, ПРЕКРАСНО. ТАК ЧТО ТАМ?
В НАШЕМ ПРОШЛОМ ПРИМЕРЕ С ПРЫЖКАМИ В ВЫСОТУ УЧАСТВОВАЛО ЧЕЛОВЕЧЕСКОЕ ТЕЛО, КОТОРОЕ ДВИГАЕТСЯ И УСЛОЖНЯЕТ ЗАДАЧУ.
ТАК ЧТО ДАВАЙ ОБРАТИМСЯ К БОЛЕЕ ПРОСТОМУ ПРИМЕРУ: ПОДБРОШЕННОМУ ВВЕРХ МЯЧУ.
РАССЛАБЛЯЕТСЯ!



* Частный случай закона сохранения энергии.


ФЬЮТЬ
О'КЕЙ, О'КЕЙ!
ОДНАКО, ЧТОБЫ ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЫПОЛНЯЛСЯ, СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА ДОЛЖНО БЫТЬ МАЛО, И ТОГДА ИМ МОЖНО ПРЕНЕБРЕЧЬ.
АГА!
ТРЕНИЕ И СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА ТОЖЕ МОГУТ ПРИВЕСТИ К ПРЕВРАЩЕНИЮ ЭНЕРГИИ ИЗ ОДНОГО ВИДА В ДРУГОЙ.
ТАК Я И ДУМАЛА!
БАЦ!
СОПРОТИВЛЕНИЕ ВОЗДУХА МОЖНО РАССМАТРИВАТЬ КАК СТОЛКНОВЕНИЯ МЯЧА С МОЛЕКУЛАМИ ВОЗДУХА. В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭНЕРГИЯ ПЕРЕДАЁТСЯ МОЛЕКУЛАМ ВОЗДУХА И МЕХАНИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ УМЕНЬШАЕТСЯ.
ОДНАКО И В ЭТОМ СЛУЧАЕ, ЕСЛИ РАССМАТРИВАТЬ ТАКЖЕ ЭНЕРГИЮ ТАКИХ МИКРОСКОПИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, КАК МОЛЕКУЛЫ, ТО ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ ВСЁ ЖЕ БУДЕТ ВЫПОЛНЯТЬСЯ.
ДОЛЖНО БЫТЬ, ЭТО ВАЖНЫЙ ЗАКОН, РАЗ ОН И НА МОЛЕКУЛЫ РАСПРОСТРА-НЯЕТСЯ!

Лаб ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ДЕЙСТВИИ

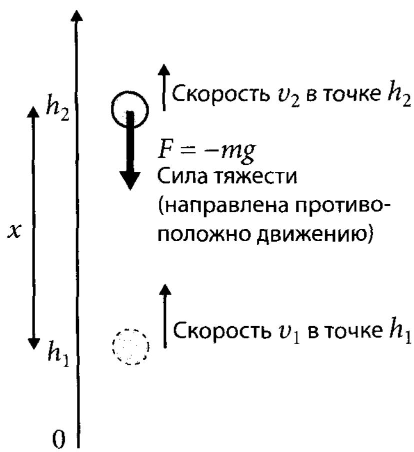
Докажем, что закон сохранения механической энергии работает, когда мы бросаем мяч вертикально вверх.

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

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

Давай обсудим!

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

$$F = -mg.$$

Это значит, что работа, совершённая 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.

Давай обсудим!

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:

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

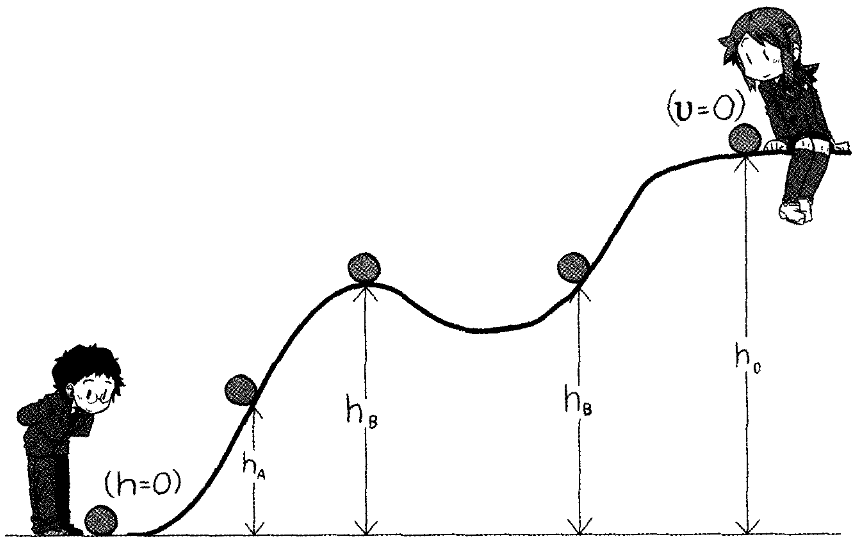
Подставив числа в это уравнение, мы сможем найти начальную скорость, которой должен обладать мяч, чтобы достичь заданной высоты!

Находим скорость и высоту подброшенного мяча

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:

$$E = mgh.$$

Давай обсудим!

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

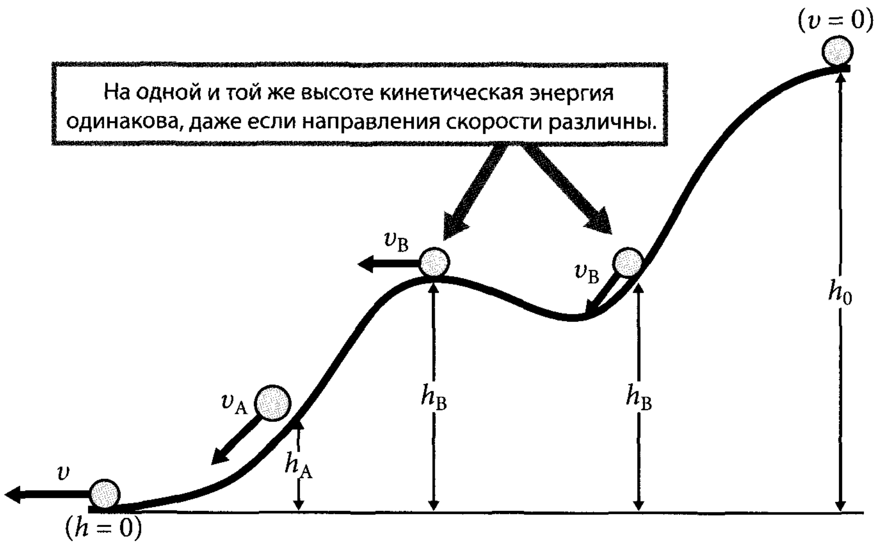
По-моему, в наивысшей точке вся кинетическая энергия превратилась в потенциальную, значит,

$E = \frac{1}{2}mv^2$, 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 рисунка, то потенциальная энергия в этих точках тоже будет одинакова, поэтому и кинетическая энергия в них будет одинакова, даже если направление скорости различно.



Давай обсудим!

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?

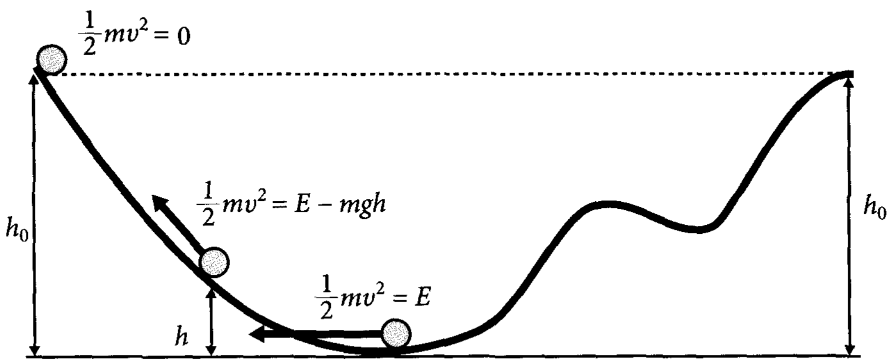
Да, сможет, при условии, что трение и сопротивление воздуха пренебрежимо малы. Приняв высоту на пути подъёма за h, найдём механическую энергию на этой высоте, воспользовавшись законом сохранения энергии:

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

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

$$\frac{1}{2}mv^2 = E - mgh_0 = 0,$$

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.




УВИДЕЛА ТВОЙ ПОСЛЕДНИЙ РИСУНОК... И МНЕ ЧТО-ТО ЗАХОТЕЛОСЬ ПОКАТАТЬСЯ НА АМЕРИКАНСКИХ ГОРКАХ...
КИВ
КИВ
О ДА, ПАРК РАЗВЛЕЧЕНИЙ —
ЭТО ЦЕЛЫЙ КЛАД ЗАКОНОВ ФИЗИКИ.
ЧТО?
И ПОЧЕМУ ТЫ ВЕЗДЕ ВИДИШЬ ТОЛЬКО ФИЗИКУ?..
НИЧЕГО, ЭТО Я С СОБОЙ РАЗГОВАРИВАЮ.
ЧТО Ж...
ТЕПЕРЬ МОЖНО СКАЗАТЬ, ЧТО ОСНОВЫ МЕХАНИКИ МЫ В ОБЩИХ ЧЕРТАХ ИЗУЧИЛИ.
РАД, ЧТО ТЫ ВЫДЕРЖАЛА ЭТО.
СПАСИБО.
БЛАГОДАРЯ ТЕБЕ Я НАЧАЛА ПОНИМАТЬ КОЕ-ЧТО В ФИЗИКЕ!
ОТЛИЧНО! И ЕСЛИ ФИЗИКА ТЕБЕ ХОТЯ БЫ ЧУТЬ-ЧУТЬ ПОНРАВИЛАСЬ,
ТО Я ТОЖЕ РАД.


ТАК ТЫ ПРИДЁШЬ ПОСМОТРЕТЬ НА МОЙ СЛЕДУЮЩИЙ МАТЧ С САЯКОЙ
ИЛИ НЕТ?
ОЙ, Я НЕ МОГУ.
У МЕНЯ В ЭТОТ ДЕНЬ ДОКЛАД ПО ФИЗИКЕ.
ОХ...
АХ!
ПРАВДА?
ОЧЕНЬ ЖАЛЬ. Я ХОТЕЛА, ЧТОБЫ ТЫ УВИДЕЛ МОЮ ПОБЕДУ!
......
НУ ЛАДНО.
ДАВАЙ В ДАЛЬНЕЙШЕМ ТОЖЕ БУДЕМ СТАРАТЬСЯ, КАЖДЫЙ В СВОЁМ ДЕЛЕ!

ДАВАЙТЕ РАЗБЕРЁМСЯ!

ЕДИНИЦЫ ЭНЕРГИИ

Единицу энергии можно найти из определения кинетической энергии:

кинетическая энергия = 1/2 × масса × (скорость)^2.

Из этого следует:

единица энергии = единица массы × единица скорости × единица скорости,
или 1 джоуль = кг·м^2/с^2.

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

единица энергии = единица работы.

Но справедливо также следующее:

единица работы = единица силы × единица длины = (Н)×(м) = (Н·м).

На первый взгляд вторая единица (Н·м) непохожа на джоуль (кг·м^2/с^2). Но вспомним, что ньютон (Н) равен 1 кг·м/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 кг = = 0.102 кг = 102 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°С 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

$$100 \text{ ккал} = 100\,000 \text{ кал} = 4.2 \times 100\,000 \text{ Дж} = 420\,000 \text{ Дж}.$$

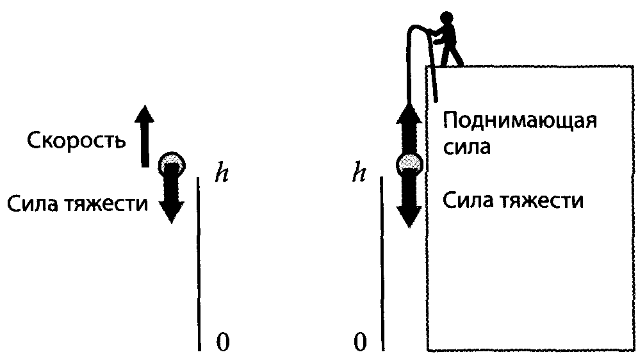
Выглядит это как довольно большая величина, но на самом деле это не так, если сравнить её с количеством энергии, необходимым нам для жизни. По данным Министерства здравоохранения, труда и благосостояния Японии, в день необходимо потреблять около 2200 ккал для 17-летней девушки и около 2700 ккал для 17-летнего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

$$2200 \text{ ккал} \times 1000 \text{ кал/ккал} \times 4.2 \text{ Дж/кал} = 9\,240\,000 \text{ Дж}.$$

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 1 000 000 кг на 1 м! Это говорит о том, что ежедневно для поддержания жизни мы потребляем гигантское количество энергии.

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.



Подбрасывание Поднятие

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):

$$\text{работа} = -mgh. \tag{1}$$

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

изменение кинетической энергии тела = работа, совершённая 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, совершённой 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:

поднимающая сила + сила тяжести = 0.

Следовательно,

поднимающая сила = –сила тяжести = mg,

из чего следует, что

работа, совершаемая поднимающей силой над телом = mgh.

Разумеется, выполняется соотношение

работа поднимающей силы над телом + работа силы тяжести над телом = 0

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

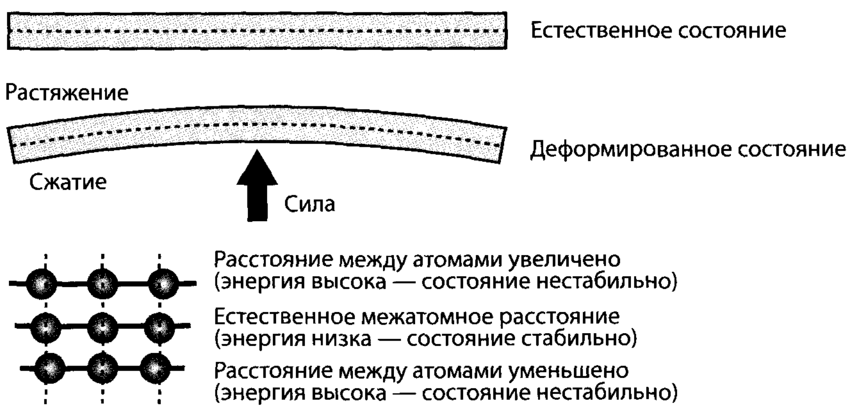
изменение кинетической энергии = 0,

значит, равнодействующая сила не совершает работы. Работа, совершённая 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].

[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,

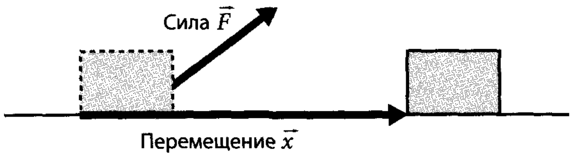
$$h = \frac{(1000/36)^2}{2 \times 9.8} \approx 39.4 \text{ [м]}.$$

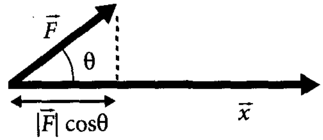
НАПРАВЛЕНИЕ СИЛЫ И РАБОТА

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 виде[1]):

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

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

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

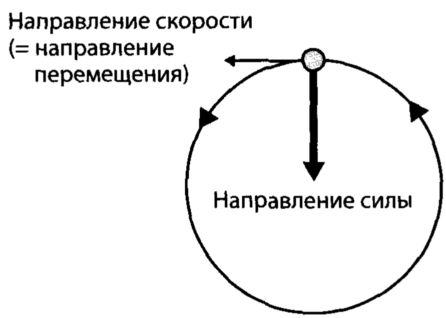
То есть окажется, что

работа = сила × 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 (центростремительная сила), однако работа равна 0, поэтому кинетическая энергия не изменяется. Благодаря этому тело может двигаться по окружности с постоянной скоростью.



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.

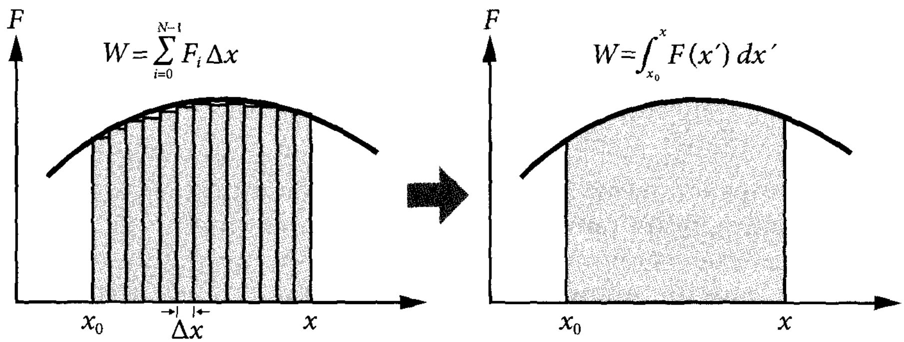
РАБОТА В СЛУЧАЕ ПЕРЕМЕННОЙ СИЛЫ (ОДНОМЕРНЫЙ СЛУЧАЙ)

Для постоянной силы работа была определена как

$$\text{работа} = \begin{matrix}\text{пройденный} \\ \text{телом путь}\end{matrix} \times \begin{matrix}\text{составляющая силы} \\ \text{в направлении движения}\end{matrix}.$$

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):

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



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

$$\left(\frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2\right) + \left(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2\right) + \left(\frac{1}{2}mv_3^2 - \frac{1}{2}mv_2^2\right) + \ldots = \\ = F_0\Delta x + F_1\Delta x + F_2\Delta x + \ldots. \qquad (2)$$

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:

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

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

$$W = \int_{x_0}^{x} F(x)\, dx, \tag{3}$$

можно записать:

$$\frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{2} m v_0^2 = W. \tag{4}$$

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

$$\int_0^t m v \frac{dv}{dt}\, dt = \int_0^t F v dt.$$

Применив для левой части формулу

$$\frac{d(v^2)}{dt} = 2v \frac{dv}{dt},$$

а для правой — $v = dx/dt$, получим

$$\int_0^t \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) dt = \int_0^t F \left(\frac{dx}{dt} \right) dt,$$

или

$$\int_{v_0}^{v} d\left(\frac{1}{2} m v^2 \right) = \int_{x_0}^{x} F dx \tag{5}$$

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) представлет собой изменение кинетической энергии:

$$\int_{v_0}^{v} d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2,$$

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

$V = mgx$ и $F = -mg$,

мы получим соотношение

$$F = -\frac{dV}{dx}. \tag{6}$$

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

$$\begin{aligned} W &= -\int_{x_0}^{x} \frac{dV}{dx'}\,dx' = -\int_{V(x_0)}^{V(x)} dV = \\ &= -[V(x) - V(x_0)]. \end{aligned} \tag{7}$$

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 СИЛА

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, совершаемую 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 энергию[1] 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.

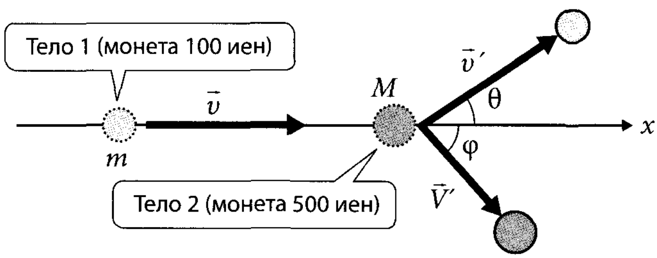
Однако при рассмотрении явлений на молекулярном уровне нельзя забывать о том, что для описания мира молекул в общем случае необходима квантовая механика, а описанные в данной книге законы движения Ньютона к микромиру неприменимы. Кроме того, когда речь идёт об энергии атомных ядер, применять механику 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:

по оси x: $mv = mv' \cos\theta + MV' \cos\varphi$,

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 $\cos\varphi$ и $\sin\varphi$, в соотношение $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$, мы можем избавиться от φ. Сделав это, мы получим выражение[1)]

$$V'^2 = \left(\frac{m}{M}\right)^2 (v^2 - 2vv'\cos\theta + v'^2).$$

Подставив его в формулу закона сохранения импульса, получим:

$$v' = \frac{(m/M)\cos\theta + \sqrt{1-(m/M)^2\sin^2\theta}}{1 + m/M}\, v. \tag{8}$$

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

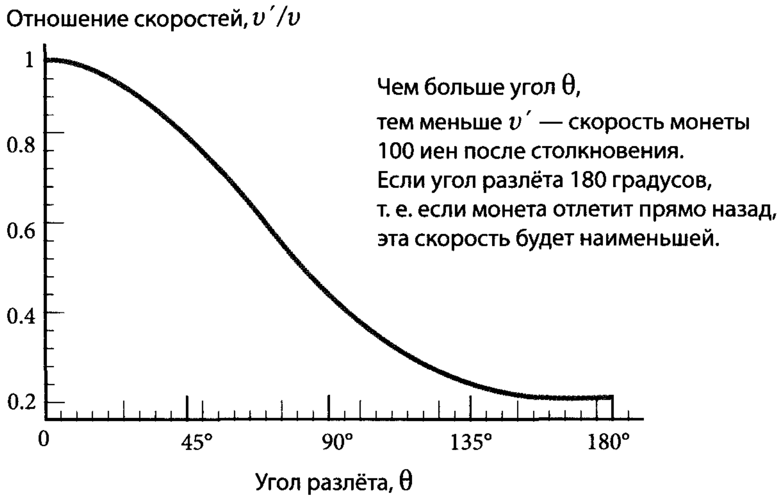
$$v' = \frac{1 - m/M}{1 + m/M}\, v.$$

Если в этой формуле принять $M \gg m$, то она будет приближаться к выражению[2)] $v' = v$. 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 покоилась, отлетит с такой же скоростью. В этом случае $V' = v$, что также можно легко понять из формулы для V'^2.

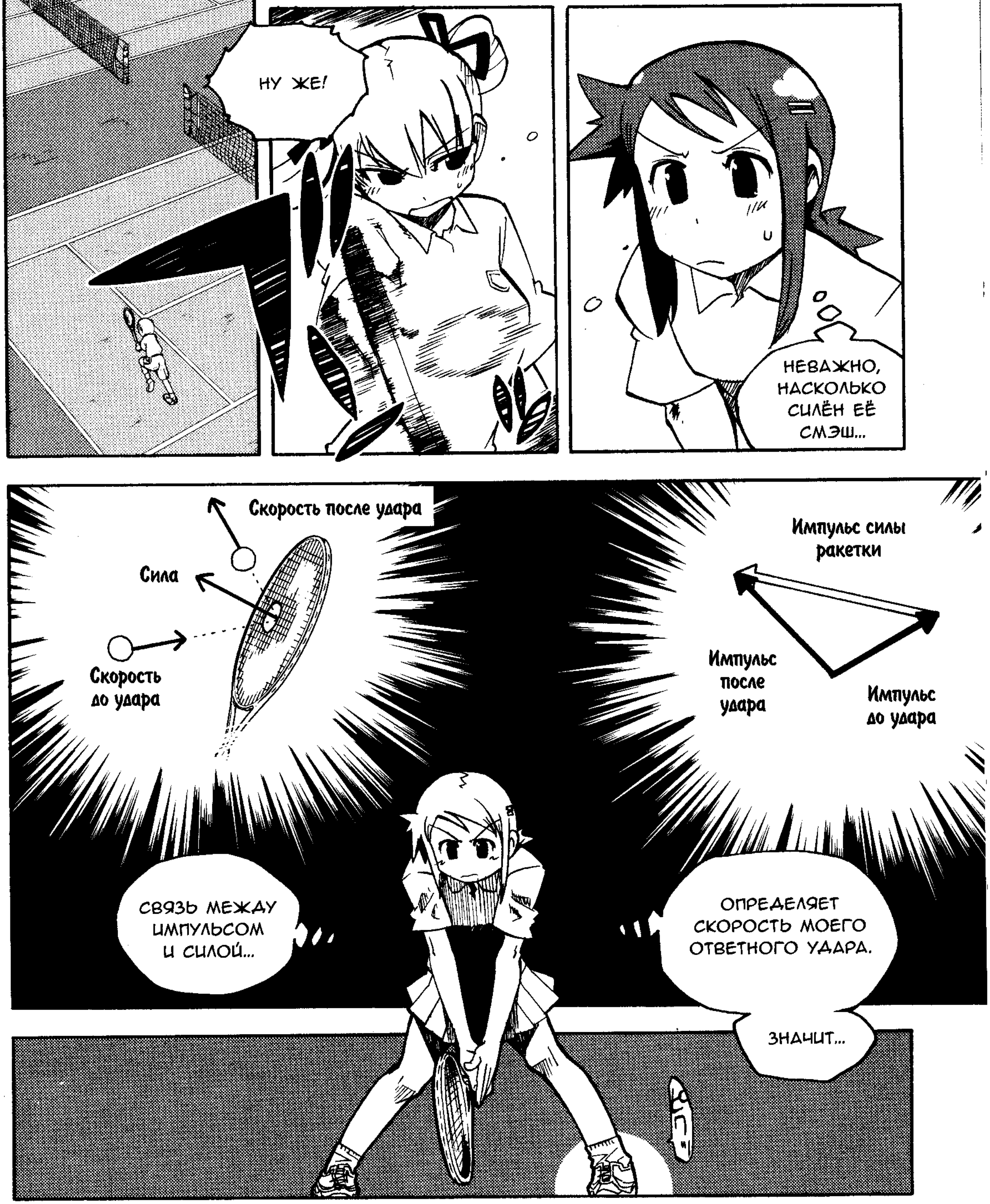
Попробуем представить зависимость отношения скоростей монеты 100 иен до и после столкновения v'/v от угла разлёта θ в виде графика. Так как масса монеты 100 иен равна 4,8 г, а монеты 500 иен — 7,0 г, значит, отношение $m/M = 4.8/7.0 \approx 0.69$. Подставив это значение в выражение (8) и произведя вычисления, мы получим нижеприведённый график.

1) Это выражение также можно получить, если изобразить векторную схему для закона сохранения импульса $m\vec{v} = m\vec{v}\,' + M\vec{V}$ 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
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
45°
90°
135°
180°
Угол разлёта, θ
Чем больше угол θ,
тем меньше v' — скорость монеты
100 иен после столкновения.
Если угол разлёта 180 градусов,
т. е. если монета отлетит прямо назад,
эта скорость будет наименьшей.

ЭПИЛОГ МАТЧ МЕГУМИ И САЯКИ




СКОРОСТЬ ОПРЕДЕЛЯЕТ ДАЛЬНЕЙШЕЕ ДВИЖЕНИЕ МЯЧА!
ВОТ ТАК!
О, ТЫ СТАЛА НАБЛЮДАТЕЛЬНА!
РИОТА ХОРОШО МЕНЯ ОБУЧИЛ!
НО РИОТА...
ОН ВЕДЬ НЕ СМОГ ПРИЙТИ СЕГОДНЯ, ДА?
ТЫ ЗНАЕШЬ ВСЁ, ЧТО НУЖНО. ЧТОБЫ ПОБЕДИТЬ, ТЕБЕ НАДО ТОЛЬКО СОСРЕДОТОЧИТЬСЯ.


БАМ
ОЙ!
Саяка — «больше».
ПЫХ ПЫХ
НУ ЧТО,
Я СДЕЛАЛА ТЕБЯ, МЕГУМИ.
ПЫХ ПЫХ
НЕТ, ПОКА ЕЩЁ НЕТ.
НИНОМИ...
МЕ.. МЕГУ!!!


РИОТА?!
Я УСПЕЛ...
ТЫ ЗДЕСЬ!!!
......
Я ПОПРОСИЛ, ЧТОБЫ МОЙ ДОКЛАД ОТЛОЖИЛИ.
ХИ-ХИ! ЭТО ЗДОРОВО!
МЕГУ, ПОМНИ, ТЫ ДОЛЖНА СОСРЕДОТОЧИТЬСЯ НА ИГРЕ.
ХОРОШО!
Я МОГУ ЭТО СДЕЛАТЬ. СЕЙЧАС МОЯ ПОДАЧА.


ЭЙ, ТЫ НАКОНЕЦ-ТО НАЗВАЛ МЕНЯ МЕГУ!
ЧТО МЕЖДУ НИМИ ПРОИСХОДИТ?
ИМПУЛЬС
ИМПУЛЬС СИЛЫ
ВРЕЖЬ ПО МЯЧУ!
УНИЧТОЖЬ ЕГО, СОКРУШИ ЕГО!


Очко!
ВОТ ЭТО СКОРОСТЬ!
ОНА СТАЛА ИГРАТЬ НАМНОГО ЛУЧШЕ!
ИНТЕРЕСНО, У НЕЁ ЧТО, НОВЫЙ ТРЕНЕР?
ЕЩЁ!

ТАК ДЕРЖАТЬ!
Очко! «Больше» у Мегуми!
Я НЕ МОГУ ПРОИГРАТЬ.
Я ЖЕ САМАЯ ЛУЧШАЯ.
ДАВАЙ УЖЕ СДЕЛАЕМ ЭТО. ОСТАЛАСЬ ЛИШЬ ОДНА ПОДАЧА
ЛИШЬ ОДНА.
САЯКА, СОБЕРИСЬ!!!
Я МОГУ ЭТО СДЕЛАТЬ!


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?


ЭЙ ТЫ!
ТЫ ОТ МЕНЯ НЕ УЙДЁШЬ, ТАК И ЗНАЙ.
ЭМ...
КХМ... БУДЕШЬ МОИМ ПАРТНЁРОМ НА СЛЕДУЮЩЕЙ ПАРНОЙ ИГРЕ?
......
КОНЕЧНО, ПО РУКАМ.
ЗНАЕШЬ, РИОТА,
ЭТО ПОХОЖЕ НА СИЛУ ПРИТЯЖЕНИЯ.
ВОЗМОЖНО, ТАК И ЕСТЬ...
О ЧЁМ ЭТО ВЫ?!

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

О

П

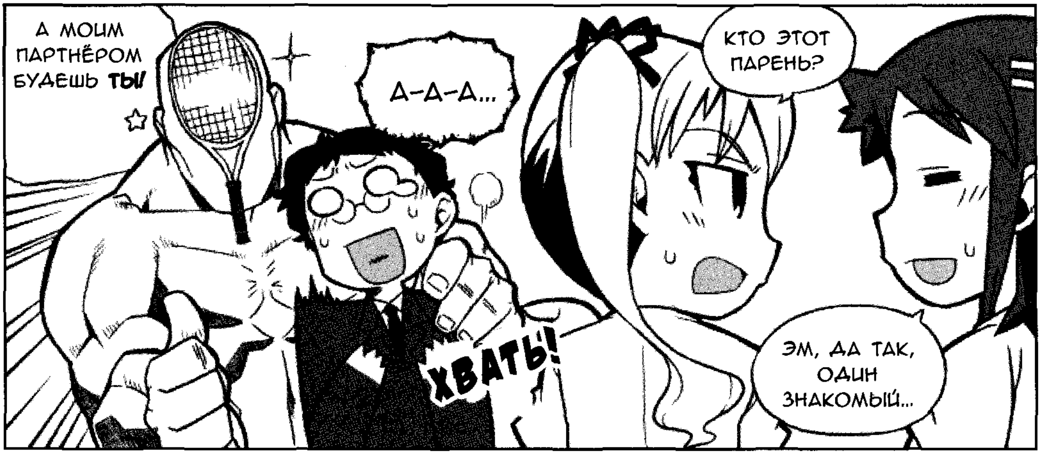
Р

С

Т

У

Ф



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 70×90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Объём 15 п. л. Усл. п. л. 17,5. Тираж 1500 экз.
Код MNG-MECH. Заказ №О-1758.

Издательский дом «Додэка-XXI»
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-Пресс».
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.

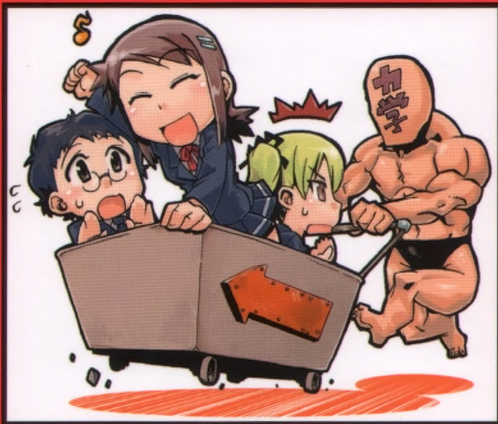
Приставки единиц измерения в СИ

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	мега-	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
Α	α	альфа	Ν	ν	ню
Β	β	бета	Ξ	ξ	кси
Γ	γ	гамма	Ο	ο	омикрон
Δ	δ	дельта	Π	π	пи
Ε	ε	эпсилон	Ρ	ρ	ро
Ζ	ζ	дзета	Σ	σ	сигма
Η	η	эта	Τ	τ	тау
Θ	θ	тета	Υ	υ	ипсилон
Ι	ι	йота	Φ	φ	фи
Κ	κ	каппа	Χ	χ	хи
Λ	λ	лямбда	Ψ	ψ	пси
Μ	μ	мю	Ω	ω	омега

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА



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 "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.

ISBN 978-5-94120-229-4

9 785941 202294