

О двух ударах в механике

В.И.Николаев

МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет

Обсуждается вопрос о различных вариантах трактовки понятий «абсолютно упругий удар» и «абсолютно неупругий удар» в курсе механики. Анализируются возможные причины ошибок, которые делают студенты и школьники при решении задач на тему об этих двух разновидностях удара. Обращается внимание на недопустимость произвола при формировании понятийного аппарата в рамках физики как учебной дисциплины.

1. Введение

В курсе физики, – как в вузовском, так и школьном, – раздел «Механика» занимает первое место. Так и хочется добавить: не только почетное первое место, но и самое ответственное. Ведь именно с нее начинается системное изучение физики как учебной дисциплины. Именно в «Механике» закладываются основы уважительного отношения к понятийному аппарату физики. Или, бывает, ... неуважительного?

В этом процессе велика роль так называемых типовых задач. С их помощью формируются умения применять физические законы, начиная с простых и наглядных случаев. Нередко в задачах встречаются типовые «сюжеты». К их числу можно отнести и различные виды удара, которые и обсуждаются в данной статье.

Побудительным мотивом к написанию статьи послужили многолетние наблюдения автора за тем, как при изучении механики трактуются различные виды удара, прежде всего две знаменитые его разновидности – «абсолютно упругий удар» и «абсолютно неупругий удар». Эти наблюдения привели к мысли о том, что, быть может, целесообразно поделиться выводами на эту тему с коллегами-преподавателями. Хотя бы в связи с тем, что очень уж велик «разнобой» в смысловой трактовке и даже в самом отношении к видам ударов. Так, примечательно, что далеко не во всех известных руководствах по механике нашлось место в «Предметном указателе» для этих двух ударов (ср., например, [1–7]).

2. О моделях ударов

Рассмотрение вопроса по существу начнем с понятия «удар». Тому есть веская причина: ведь пока мы не определимся в выборе смысловой трактовки этого понятия, все рассуждения о разновидностях удара и об их особенностях останутся неопределенными.

Сначала откроем «Словарь русского языка» С.И.Ожегова [8]. На стр. 758 читаем: «Удар – 1. Резкий, сильный толчок, прикосновение к кому-чему-н. с силой». Переводя эти житейские слова на язык физических терминов, сделаем вывод: удар – это контактное взаимодействие тел, причем длительность этого взаимодействия мала по сравнению с каким-то другим характерным временем в данной задаче. Заметим себе еще (это нам скоро пригодится): длительность взаимодействия тел при их соударении не равна нулю.

При системном подходе к изучению физики (например, при изучении школьного курса физики или вузовского общего курса физики) следуют принципу «от простого – к сложному». Это дает возможность на каждом из этапов изучения постепенно усложнять круг рассматриваемых явлений, выбирая для них все более сложную абстрактную модель. Удобнее всего это делать на основе одного или нескольких подходящих классификационных признаков. Так обстоит дело, например, при рассмотрении видов движения тел в «Кинематике» или при изучении механических и электромагнитных колебаний. И опять-таки все начинается с формирования понятийного аппарата.

Что касается ударов, то учащихся сразу же, в самом начале изучения соответствующей темы в разделе «Механика», ждет «капкан». Если различать удары не по геометрическому, а по физическому признаку, то, следуя сложившейся традиции, можно выделить два их вида: «абсолютно упругий удар» и «абсолютно неупругий удар». Словесное сходство этих двух понятий столь велико, что оно порождает иллюзию об одинаковости признака, положенного в основу «классификации» ударов, которая якобы содержит две названные разновидности в качестве крайних случаев. Поэтому, приступая к изучению темы, стоит сразу же обратить внимание учащихся на различие классификационных признаков. В первом случае это – энергия (далее уточним, какая именно), во втором – скорость (уточним ниже, какая). Сами же названные удары вовсе не являются крайними случаями. Это всего лишь два различных случая удара.

Далее, в ходе обсуждения формулировок определений, нам потребуются поясняющие примеры. Пусть это будут примеры в виде мысленных экспериментов. Избегая преждевременных обобщений (и связанных с ними сложностей), будем всякий раз рассматривать, по возможности, простые случаи. Так, будем считать, что в столкновении участвуют только два тела. Эти тела – шарики, однородные и сплошные (по крайней мере, до тех пор, пока нам не потребуется внести какие-либо уточнения). Удар, во имя той же простоты, будем считать центральным. Заодно, пользуясь подходящим случаем, вспомним, что это за удар:

Центральным называется такой удар, при котором скорости соударяющихся тел направлены вдоль линии, соединяющей их центры.

А теперь обратимся к формулировкам определений. Поскольку абсолютно упругий и абсолютно неупругий удары различаются отнюдь не по какому-либо классификационному признаку, начать можно с любого из них. Начнем с абсолютно упругого – как в [2] (и в отличие от [3]).

3. Абсолютно упругий удар

Эта разновидность удара труднее для рассмотрения, чем абсолютно неупругий удар. По крайней мере, к такому выводу склоняет практика ведения занятий на тему об ударах. Проявляется это в том, что в случае абсолютно упругого удара разнообразие ошибок в формулировках учащихся гораздо более велико. Впрочем, мы сейчас это увидим.

Дальнейшее обсуждение вопроса об ошибках учащихся (и не только их) построим следующим образом. Начнем с формулировки, содержащей, по

возможности, наибольшее число типичных ошибок и дефектов. В ходе обсуждения будем постепенно улучшать ее. На каждом этапе будем вносить только по одному улучшению. Такой «регламент» разговора даст нам возможность внимательно разглядеть каждую из погрешностей и, более того, увидеть отличительные особенности типовых случаев.

1) Удар, при котором энергия соударяющихся тел остается постоянной, называют абсолютно упругим.

Вот она – худшая из формулировок. Отнесемся к ней бережно, как условились. Обратим вначале внимание на то, что приведенная фраза по форме своей не может служить определением. При помощи этой фразы нам сообщается факт, бесспорно, интересный и важный: «... называют ...». Не все, наверное, «называют»? Кто-то и «не называет»? Интересно, каких мнений больше? А как еще «называют»? И как только не называют! – не так ли? А нам-то как быть? Почему мы должны обсуждать чьи-то привычки? Все такие вопросы уводят в сторону от предмета разговора. Эту неопределенность надо устранить. Итак, первое улучшение: вместо «называют» – «называется»:

2) Удар, при котором энергия соударяющихся тел остается постоянной, называется абсолютно упругим.

Стало лучше, но тоже плохо. Казалось бы, вот теперь – никаких кривотолков: «называется» – и все! Да не тут-то было. Неоднозначность осталась, поскольку не обеспечена единственность трактовки. Действительно, эта улучшенная формулировка не дает возможности ответить на вопрос: а может быть, есть и другие разновидности абсолютно упругого удара, кроме той, что описана в приведенной фразе? Устранить этот дефект можно путем изменения порядка слов: надо «всего лишь» начать с определяемого понятия – «абсолютно упругого удара». Есть, как известно, две основных версии такого начала – либо в именительном падеже, либо в творительном. Выберем вторую версию:

3) Абсолютно упругим называется такой удар, при котором энергия соударяющихся тел остается постоянной.

Однозначности добились. Заодно позаботились об удобствах учащихся: ведь им удобно, когда формулировки определений представляют собой однотипные конструкции, начинаясь всякий раз с определяемого понятия. Их и заучивать легче. Теперь займемся очередным дефектом. Обратим внимание на слова «удар, при котором». Что значит «при котором»? В качестве ответа возьмем эквивалентные по смыслу слова: «в ходе удара», или «в процессе удара». Значит, речь идет о такой стадии столкновения, когда еще не закончился процесс перераспределения вкладов в механическую энергию соударяющихся тел. Но традиционная трактовка «абсолютно упругого удара» совсем не такая. Тем и удобен такой удар для рассмотрения, что дает возможность избежать громоздких вычислений (непростых – как с математической, так и с физической точек зрения), решая задачу «в конечных разностях». Слова «удар, при котором» заменим на традиционные – «удар, в результате которого». Во избежание кривотолков будем помнить об очевидном: «в результате» – значит «тотчас после удара», или «сразу после удара» (тела только что перестали соприкасаться):

4) *Абсолютно упругим называется такой удар, в результате которого энергия соударяющихся тел остается постоянной.*

Добравшись до термина «энергия», обратимся к очередному дефекту. Допущена физическая ошибка: не сказано, какая разновидность энергии имеется в виду. Любая? А ведь тепловая энергия – тоже энергия. Неужели «разрешается» переход энергии соударяющихся тел в результате абсолютно упругого удара в тепловую? Не будем забывать, кроме того, что в разделе «Механика» изучается энергия только механическая, с двумя ее разновидностями – кинетической и потенциальной. Внесем поэтому уточнение: вместо «энергия» пусть будет сказано «механическая энергия»:

5) *Абсолютно упругим называется такой удар, в результате которого механическая энергия соударяющихся тел остается постоянной.*

Конечно, стало лучше. Но все равно неправильно. Выходит, что в результате абсолютно упругого удара механическая энергия тел может, переходить, хотя бы частично, в потенциальную энергию упругих деформаций? Такая трактовка абсолютно упругого удара недопустима. Она противоречит взглядам на абсолютно упругий удар, сложившимся в физике давным-давно. А традиции надо уважать и беречь. В противном случае не на что будет опереться при решении задач, в том числе и при изучении разновидностей ударов в механике. Сделаем уточняющую замену (устраняя тем самым «лазейку» для потенциальной энергии): скажем вместо «механическая» – «кинетическая»:

6) *Абсолютно упругим называется такой удар, в результате которого кинетическая энергия соударяющихся тел остается постоянной.*

Стало почти правильно. На очереди неточность, на которую редко обращают внимание. Доверившись этой очередной формулировке, можно подумать, что в результате абсолютно упругого удара кинетическая энергия каждого из соударяющихся тел остается постоянной. Так бывает, но далеко не всегда. В качестве примера можно привести случай центрального, абсолютно упругого удара двух одинаковых шариков. Если непосредственно перед ударом первый из них движется, а второй покоится, то в результате удара кинетическая энергия каждого из них изменится. У первого она станет равной нулю, а у второго, наоборот, – не равной нулю. Придется внести еще одно уточнение: вместо «кинетическая энергия» надо сказать более полно и точно – «суммарная кинетическая энергия»:

7) *Абсолютно упругим называется такой удар, в результате которого суммарная кинетическая энергия соударяющихся тел остается постоянной.*

И эту формулировку, теперь уже вполне правильную, тоже можно улучшить. Ее можно сделать еще более полезной для тех, кто изучает механику. Почему бы не сделать и это тоже? Дело в том, что при решении многих задач механики на тему об ударах необходимо бывает воспользоваться тем или иным законом сохранения. С помощью выбора подходящих слов для формулировки определения можно подтолкнуть учащихся в нужном направлении. Вот и сейчас, когда речь идет об одной из разновидностей механической энергии, можно употребить вместо глагола «остается» такой же по смыслу глагол «сохраняется». Это и будет легким напоминанием о возможности использования закона сохранения механической энергии.

Именно это и сделано в приводимой ниже итоговой версии:

Абсолютно упругим называется такой удар, в результате которого суммарная кинетическая энергия соударяющихся тел сохраняется.

Эту последнюю формулировку можно сделать немного короче. Из нее можно убрать эмоциональное словечко «такой», которое совсем не обязательно: оно лишь выражает неравнодушие к физике. И вот что получится:

Абсолютно упругим называется удар, в результате которого суммарная кинетическая энергия соударяющихся тел сохраняется.

4. Абсолютно неупругий удар

Обсуждение версий формулировок определения абсолютно неупругого удара построим по той же схеме, что и в случае абсолютно упругого удара, – по принципу «от худшего – к лучшему». Постараемся при этом, по возможности, выдержать соответствие между формулировками, содержащими сходные по смыслу дефекты.

Первые три варианта напрашиваются сами собой – по аналогии с рассмотренным уже случаем. Вот они:

1) удар, при котором скорости соударяющихся тел становятся одинаковыми, называют абсолютно неупругим;

2) удар, при котором скорости соударяющихся тел становятся одинаковыми, называется абсолютно неупругим;

3) абсолютно неупругим называется такой удар, при котором скорости соударяющихся тел становятся одинаковыми.

Принципиально нового ничего в них нет: содержащиеся в них логические и стилистические погрешности уже обсуждались в предыдущем разделе. А результатом их улучшения будет в этот раз вот такая формулировка (окончательная, причем всего лишь четвертая по счету):

Абсолютно неупругим называется такой удар, в результате которого скорости соударяющихся тел становятся одинаковыми.

На пути улучшения это – последняя версия, поскольку словесные вариации, связанные с энергией, как это было в предыдущем случае, не имеют под собой оснований.

В самом деле, нетрудно убедиться в том, что классификационный признак, по которому выделяется абсолютно неупругий удар среди всех видов столкновения тел, – другой, нежели в случае абсолютно упругого удара. Судя по приведенной формулировке, этот признак – не какая-либо энергия, а скорость одного тела относительно другого, или коротко: относительная скорость. Относительно какого именно из двух тел – не существенно, поскольку требуется, чтобы относительная скорость была равна нулю. Потому-то в некоторых версиях определения абсолютно неупругого удара так и говорится: «тела как бы слипаются». Или: «тела движутся как одно целое». Ведь,

действительно, бывает и так, что тела на самом деле слипаются в результате удара. Примером может служить соударение двух пластилиновых шариков.

И тем не менее, вопрос о механической энергии сталкивающихся тел заслуживает отдельного рассмотрения.

5. Механическая энергия после удара

Практика решения задач на тему о соударениях тел формирует у учащихся привычку считать, что в результате абсолютно неупругого удара, по крайней мере, часть первоначальной механической энергии соударяющихся тел переходит в тепло. В подтверждение такого мнения приводят обычно пример опыта (реального или, чаще всего, мысленного), в котором происходит соударение двух шариков, в результате чего эти шарики либо «слипаются» – так говорят одни, либо «как бы слипаются» – так говорят другие. В первом случае это могут быть пластилиновые шарики (они действительно слипаются), во втором – свинцовые (они после удара, не слипаясь, движутся вместе). Как известно, в обоих случаях в ходе соударения часть первоначальной кинетической энергии системы двух тел тратится на совершение работы – против действия диссипативных сил. В роли этих сил выступают силы внутреннего трения – между слоями пластилина или свинца. После удара в шариках остаются накопившиеся деформации (их так и называют – «остаточные деформации»). Таков, коротко, говоря, механизм формирования выделяющегося в ходе удара тепла. При этом тотчас после удара скорости шариков становятся одинаковыми, что и соответствует выполнению условия абсолютно неупругого удара.

Казалось бы, действительно при абсолютно неупругом ударе часть первоначальной механической энергии системы соударяющихся тел неизбежно (т.е. во всех случаях такого удара) переходит в тепло. Это, однако, не так: тепло при абсолютно неупругом ударе может вообще не выделяться. Наша очередная задача состоит сейчас в том, чтобы найти изъян в приведенных только что рассуждениях по поводу опыта с шариками.

Дело в том, что обсуждавшийся опыт можно несколько видоизменить – с таким расчетом, чтобы у шариков вовсе не было пластических деформаций в процессе удара. Иначе говоря, материал, из которого они изготовлены, можно взять таким, чтобы в них могли возникать только упругие деформации. Возможно, в ходе подготовки опыта придется в таком случае наложить ограничения на величину деформаций – они не должны выходить за пределы области упругости. К этим предосторожностям можно добавить еще изменение «конструкции» одного из шариков: снабдим его пружинкой, назначение которой в том, чтобы этот шарик с помощью пружинки мог «накапливать» потенциальную энергию упругих деформаций. Заметим попутно, что энергию упругих деформаций пружинки можно рассматривать как потенциальную энергию системы (состоящей из двух шариков). В опыте нам потребуется еще и защелка: с ее помощью можно будет фиксировать любую из деформаций пружинки, которые могут встретиться. Наконец, последнее: будем считать, что эта защелка отрегулирована таким образом, что она срабатывает в момент возникновения максимальной деформации пружинки и фиксирует эту накопившуюся деформацию. Фактически именно такая «конструкция» шарика для опыта описана в [3].

А теперь представим себе видоизмененный опыт. Например, в таком варианте. На двух вертикальных нитях висят два одинаковых шарика, разделенные легкой пружинкой, прикрепленной к одному из них. Нити с шариками отклоним на одинаковый угол в противоположные стороны в одной и той же вертикальной плоскости и отпустим их без начальной скорости. Что произойдет дальше? Постепенно набирая скорость (а с ней и кинетическую энергию), шарики достигнут нижней части своей траектории. Там они сожмут пружинку, а сами при этом остановятся. К моменту их остановки вся кинетическая энергия системы перейдет в ее потенциальную энергию – энергию упругих деформаций. В этот момент деформация пружинки будет максимальной, так что защелка сработает и пружинка не сможет разжаться. Движение частей системы прекратится, а никакого тепла при этом не выделится.

Поскольку в данном примере тела имеют в результате удара одинаковую (нулевую) скорость, описанный удар с полным основанием квалифицируем как абсолютно неупругий. На этом примере мы видим, таким образом, что при абсолютно неупругом ударе механическая энергия соударяющихся тел может сохраняться неизменной.

6. Заключение

Подведем итоги обсуждению вариантов трактовки понятий «абсолютно упругий удар» и «абсолютно неупругий удар». Вот к каким выводам можно прийти, анализируя и сопоставляя различные версии формулировок определений этих двух ударов, бытующие в среде учащихся.

Во-первых, как и в случае формулировок законов сохранения [9], варианты определений ударов можно рассматривать как основу учебного полигона, на котором они подвергаются критическому анализу и отбору.

Во-вторых, эти формулировки, взятые в их совокупности, учат уважению к терминологии и понятийному аппарату науки.

В-третьих, на примере различных по характеру ударов видно, что выбор версии трактовки явления может быть связан с выбором сразу двух классификационных признаков для его идентификации.

В-четвертых, сравнительный анализ различных формулировок определений и законов усиливает общеобразовательную роль физики как учебной дисциплины.

Литература

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики, т. 1. М.: ГИТТЛ, 1953.
2. Хайкин С.Э. Физические основы механики. М.: Физматгиз, 1963.
3. Стрелков С.П. Механика. 2-е изд. М.: Наука, 1965.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т. 1. М.: Наука, 1974.
5. Матвеев А.Н. Механика и теория относительности. М.: Высшая школа, 1986.
6. Дик Ю.И. и др. Физика: Большой справочник для школьников и поступающих в вузы. 2-е изд. М.: Дрофа, 1999.
7. Алешкевич В.А., Деденко Л.Г., Караваев В.А. Механика. М.: Изд. Центр «Академия», 2004.
8. Ожегов С.И. Словарь русского языка. М.: Русский язык, 1978.

9. Николаев В.И. О законах сохранения в разделе «Механика». // Физическое образование в вузах, Т. 13, № 2, 2007, с. 3–13.

Abstract

On two types of impacts in mechanics

V.I.Nikolaev

M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

The question on various versions of treatment of “absolutely elastic impact” and “absolutely inelastic impact” in mechanics is discussed. The article analyses the probable causes of mistakes made by students and school pupils during the process of decision of tasks on the topic connected with these two impacts. The attention is paid to the statement that arbitrary is inadmissible when forming the notations system in physics as an educational branch.